

ISSN 2079-3928

# Природо- пользование



2  
2024

Государственное научное учреждение  
«Институт природопользования  
Национальной академии наук Беларусь»

# Природопользование

2024. № 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.

Размещен в библиографической базе данных научного цитирования  
"Российский индекс научного цитирования" (РИНЦ).

Выходит 2 раза в год

## Главный редактор

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

## Редакционная коллегия

Хомич В. С. – доктор географических наук, доцент (заместитель главного редактора)

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

Курсо 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

---

2024. № 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 Cherepanetskii** – 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.** Компонентно-гармонический метод сверхдолгосрочного прогнозирования 5  
Атлантической мультидекадной осцилляции

*Loginov V. F., Mikutskiy V. S. The component-harmonic method of ultra-long-term forecasting of the Atlantic multidecadal oscillation*

---

**Хитриков М. А., Мельник В. И.,  
Буяков И. В.** Бездождные периоды на территории Беларуси и их изменения в условиях 14  
современного изменения климата

*Khitrykau M. A., Melnik V. I., Buyakov I. V. Rainless periods in Belarus under the conditions of modern climate change*

---

**Лукша М. В., Новик А. А.** Пространственно-временное распределение повторяемости очень сильного 22  
ветра в холодный период года на территории Беларуси

*Luksha M. V., Novik A. A. Spatial and temporal distribution of very strong wind frequency of occurrence in the cold period of the year in the territory of Belarus*

---

**Кухарчик Т. И., Рябычин К. О.** Локальные источники поступления частиц макро- и микропластика полистирола 33  
в окружающую среду на территории Беларуси

*Kukharchyk T. I., Rabychyn K. O. Local sources of macro- and microplastic of polystyrene release into the environment on the territory of Belarus*

---

**Суховило Н. Ю., Самойленко В. М.,  
Вежновец В. В.** Динамика термических, гидрохимических и гидробиологических характеристик 46  
водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС в зимний период

*Sukhovilo N. Yu., Samoilka V. M., Vezhnovets V. V. Dynamics of thermal, hydrochemical and hydrobiological characteristics of Lukoml SDPP cooling pond in winter period*

---

**Кухарчик Т. И., Мелешко А. А.,  
Синицкая М. Л.** Любительская рыбалка как источник загрязнения прибрежных зон пресновод- 61  
ных водоемов и водотоков пластиком

*Kukharchik T. I., Meleshko A. A., Sinitskaya M. L. Recreational fishing as a source of pollution of coastal zones of freshwater reservoirs and watercourses with plastic*

---

**Лысенко С. А., Гапанович Е. В.** Оценки долгопериодных изменений уровенного режима подземных вод 70  
на территории Беловежской пущи с учетом восстановления пропусков во  
временных рядах наблюдений

*Lysenko S. A., Gapanovich E. V. Estimation of the long-period changes of groundwater level regime on the territory of Belovezhskaya Pushcha taking into account the omissions restoration in the time series of observations*

---

**Полюхович А. Н., Груммо Д. Г.,  
Зеленкевич Н. А.** Динамика пожаров на особо охраняемых территориях 79

*Paliukhovich A. M., Grummo D. G., Zelenkevich N. A. Dynamics of fires in specially protected areas*

---

### ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

---

**Матвеев А. В., Кухарик Е. А.** Районирование территории Центральной Беларуси по вероятности проявления 88  
современных геологических процессов

*Matveyev A. V., Kukharik E. A. Zoning of the Central Belarus area by the probability of modern geological processes manifestation*

---

**Жогло В. Г.** Особенности формирования естественных ресурсов подземных вод Брест- 94  
ского гидрогеологического бассейна

*Zhoglo V. G. Features of natural groundwater resource formation in Brest hydrogeological basin*

---

---

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

---

Кунцевич В. Б., Курзо Б. В., Методика расчета физико-технических и эксплуатационных характеристик 123  
Гайдукевич О. М., Макаренко Т. И., карбонатного сапропеля при применении скважинной гидродобычи  
Агейчик И. В., Татков А. Ю., Калилец Л. П.  
*Kuntsevich V. B., Kurzo B. V., Method of the calculating of the physical, technical and operational characteristics of carbonate sapropel in borehole hydraulic mining use*  
*Gaidukevich O. M., Makarenko T. I., Ageichik I. V., Tatkov A. Yu., Kalilets L. P.*

---

Бровка А. Г., Дедюля И. В. Установка и методика для определения температуры начала замерзания 131  
воды в грунтах, горных породах и поровых растворах  
*Brovka A. G., Dedyulya I. V. Installation and methodology for determining the temperature of the onset of freezing of water in soils, rocks and pore solutions*

---

Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Сорбционные свойства композиционных торфоминеральных материалов 137  
Пехтерева В. С., Марзан А. С.  
*Tomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Sorption properties of composite peat mineral materials*  
*Pekhtereva V. S., Marzan A. S.*

---

Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Антимикробная активность гидролизатов и оксидатов сфагнового торфа и 146  
Семенчукова Е. А., Муратова А. А. сфагнового мха  
*Zhmakova N. A., Makarova N. L., Antimicrobial activity of the hydrolysates and oxides of sphagnum peat and Semenchukova E. A., Muratova A. A. sphagnum moss*

---

Рупасова Ж. А., Яковлев А. П., Влияние удобрений на агрохимические свойства выработанного торфяника 159  
Коломиец Э. И., Аleshchenkova З. М., верхового типа под посадками виргинильных растений клюквы крупноплод-  
Картышкова Л. Е., Зимич С. П., ной в Беларуси  
Вашкевич М. Н., Авраменко С. Н.,  
Лешков А. А.  
*Rupasova J. A., Yakovlev A. P., Influence of fertilizers on agrochemical properties of produced up-moor peat land Kolomiets E. I., Aleshchenkova Z. M., under large-fruit cranberry virginil plants in Belarus Kartyzhova L. E., Zimich S. P., Vashkevich M. N., Avramenko S. N., Leshkov A. A.*

---

Шелоник М. А., Янuta Г. Г. Переработка отработанного грибного субстрата методом вермикомпо- 174  
стирования  
*Shelonik M. A., Yanuta G. G. Recycling of used spent mushroom substrate by a vermicomposting method*

---

**ЮБИЛЕИ**  
**JUBILEE**

---

Анатолий Викторович Кудельский. К 90-летию со дня рождения 183  
*Anatoliy Viktorovich Kudelskij. To the 90th of the birth*

---

**ХРОНИКА**  
**CHRONICS**

---

V Международная научно-практическая конференция «Природная среда Антарктики:  
современные методы исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли» 186  
*V International Scientific and Practical Conference "The Natural environment of Antarctica: modern methods of research using remotely sensed data of the Earth"*

---

## ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-5-13>

УДК 551.509.333

Поступила в редакцию 17.10.2024

Received 17.10.2024

### КОМПОНЕНТНО-ГАРМОНИЧЕСКИЙ МЕТОД СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АТЛАНТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ

В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Сверхдолгосрочный прогноз (на год вперед и более) многолетних изменений Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) в силу преобладающего влияния Северной Атлантики на температурно-влажностный режим Беларуси представляет существенный научный и практический интерес. С целью создания указанного прогноза использовался такой известный метод сверхдолгосрочного прогнозирования, как компонентно-гармонический. Было formalизовано несколько вариантов аддитивных моделей адаптивного характера на основе линейного тренда и гармонических компонент, имитирующих квазигармонические колебания.

Модели построены с использованием скользящих временных окон с формированием прогноза на год, следующий за обучающей выборкой (скользящим окном). Рассматривались различные варианты скользящих окон, выбранных исходя из выявленных длительностей квазишестидесятилетней и квазидевятисотлетней гармоник. Определено, что второй по значимости вслед за квазишестидесятилетним колебанием в формировании значений АМО является квазидевятисотлетняя гармоника. Коэффициент корреляции наилучших моделей с наблюденными данными  $p = 0,6\text{--}0,7$ . К недостаткам моделей следует отнести занижение значений среднеквадратического отклонения.

**Ключевые слова:** Атлантическая мультидекадная осцилляция; сверхдолгосрочное прогнозирование; квазигармонические колебания.

**Для цитирования.** Логинов В. Ф., Микуцкий В. С. Компонентно-гармонический метод сверхдолгосрочного прогнозирования Атлантической мультидекадной осцилляции // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 5–13.

### THE COMPONENT-HARMONIC METHOD OF ULTRA-LONG-TERM FORECASTING OF THE ATLANTIC MULTIDECADAL OSCILLATION

V. F. Loginov, V. S. Mikutskiy

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

**Abstract.** Due to the predominant influence of the North Atlantic on the temperature and humidity regime of Belarus, the forecast of the dynamics of such a temperature indicator as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is of significant interest for the development of ultra-long-term forecasting methods (for a year ahead and more). In order to create this forecast, such a well-known ultra-long-term forecasting method was used as the component-harmonic method was used. Several variants of additive models of adaptive nature were formalized based on a linear trend and harmonic components simulating quasi-harmonic oscillations.

The models were built using moving time windows with a forecast for the year following the learning sample (moving window). Various variants of moving windows were considered, selected based on the revealed durations of the quasi-six-decade and quasi-nine-year harmonics. It is determined that the second most important after the quasi-sixty-year oscillation in the formation of AMO values is the quasi-nine-year harmonic. The correlation coefficient of the best models with the observed data is  $p = 0,6\text{--}0,7$ . The disadvantages of the models include underestimating of the values of the standard deviation.

**Keywords:** Atlantic Multidecadal Oscillation; ultra-long-term forecasting; quasi-harmonic oscillations.

**For citation.** Loginov V. F., Mikutskiy V. S. The component-harmonic method of ultra-long-term forecasting of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 5–13.

**Введение.** В настоящее время в научном сообществе имеется общее понимание того, что в климатической системе, включающей в себя океан, атмосферу, криосферу, биосферу, могут развиваться автоколебания различной длительности: от нескольких месяцев до нескольких сотен тысяч лет [1, 2].

Наличие колебания с периодом около 60–70 лет было неоднократно установлено в таких крупномасштабных характеристиках климатической системы, как Северо-Атлантическое и Северо-Тихоокеанское колебания. Краткий обзор таких работ представлен в наших последних работах [3–6], а также работах других авторов [7–14]. Как показано в работе О. М. Покровского [11], ярко квазишестидесятилетнее колебание проявляется в температуре Северного полушария и особенно в температуре высоких широт названного полушария. Причем 60–70-летнее колебание не может быть связано с антропогенной деятельностью, поскольку тренд в разностях температуры Северного и Южного полушарий не обнаруживается, хотя основные источники парниковых газов находятся в Северном полушарии [8].

В работе [3] обнаружено наличие квазипятидесятилетнего колебания в изменении продолжительности арктических вторжений.

В работе [5] установлен ряд особенностей в изменении амплитуды квазишестидесятилетнего колебания:

1) увеличение амплитуды квазишестидесятилетней компоненты от экватора в направлении высоких широт каждого из полушарий Земли: в приполярных районах доля дисперсии квазишестидесятилетней компоненты от общей дисперсии ряда температуры достигает 47,6 % в Северной Атлантике и до 38 % в приантарктических широтах;

2) увеличение амплитуды квазишестидесятилетней компоненты в изменении температуры в области таких холодных течений, как Лабрадорское и Канарское.

Одной из очевидных причин появления автоколебаний в климатической системе является непрерывное поступление солнечной энергии в экваториальные районы и переохлаждение полярных районов, что влечет обмен энергией между инерционными ее накопителями (морские льды и теплый океан в низких широтах). В отличие от океана, в силу малой инерционности («памяти») атмосфера не может накапливать энергию. В инерционных системах – океан и криосфера – период автоколебаний будет существенно более длительным [1].

Важным регулятором взаимодействия океана и атмосферы и фактором возникновения автоколебаний в функционирующей климатической системе является облачность [15]. Процесс колебаний, связанных с облачностью, вызывается потоком коротковолновой радиации. Его высокая дивергенция летом приводит к нагреванию верхнего слоя океана. Океан нагревает атмосферу, в которой развивается конвекция, приводящая к росту облачности. Растущая облачность препятствует проникновению радиации к океану, он охлаждается и охлаждает атмосферу. Конвекция прекращается, облачность уменьшается, что вновь приводит к нагреванию океана, и цикл повторяется вновь [15].

Еще в 1940-х годах академик В. В. Шулейкин дал объяснение автоколебательной системы Северной Атлантики, рассмотрев следующую цепь: ледовитость Арктики → усиление интенсивности Лабрадорского течения → уменьшение интенсивности теплого течения Гольфстрим → увеличение ледовитости Арктики [2].

В работах У. Брокера показано, что различие солености морских вод порождает перенос тепла теплыми океаническими водами Атлантики в высокие широты, тогда как холодные поверхностные воды Тихого океана движутся на юг, оттесняя теплые воды к экватору [16]. Связанные с этим различия в процессах испарения оказывают обратное влияние на соленость. Такая циркуляция является автоколебательной, поскольку избыточное испарение вызывает глубинные плотностные течения к югу, а глубинные течения, в свою очередь, вызывают избыточное испарение.

Считается, что мультидекадные изменения климата во многом порождаются долгопериодными изменениями в термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики. Во всех характеристиках этой циркуляции на значимом уровне выделяются долгопериодные квазициклические колебания с характерными периодами 50–70 лет. Это явление получило название Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) [17, 18]. В качестве индикатора данных колебаний широко используется индекс АМО, представляющий собой аномалии среднемесячной температуры поверхности моря в Северной Атлантике. К настоящему времени получен ряд АМО с почти полуторавековой длительностью (1856–2022 гг.) [19].

В работе [6] выявлено наличие мощной квазишестидесятилетней компоненты в изменении индекса АМО, вклад которой в общую изменчивость рядов составляет в среднем до 47 % в отдельные месяцы теплого времени года. Установлено также наличие заметной квазидевятилетней гармоники в колебаниях индекса АМО. Вклад квазидевятилетней гармоники от общей изменчивости рядов достигает от 7 до 11 %. Для среднегодовых значений АМО вклад квазидевятилетнего колебания составляет около 8,5 %.

**Цели, материалы и методика исследований.** В представленной работе с целью разработки метода сверхдолгосрочного прогнозирования АМО рассмотрено и formalизовано несколько вариантов аддитивных моделей с использованием компонентно-гармонического метода сверхдолгосрочного

---

прогнозирования. Подобный метод неоднократно использовался в работах И. В. Максимова и его школы [20], а также в работах других авторов [21].

Использовались данные значений индекса АМО месячного разрешения за период 1856–2022 гг. проекта Kaplan Extended SST V2 [19], доступные на сайте Лаборатории физических наук Национального управления океанических и атмосферных исследований (США) [22]. С учетом того, что особенно ярко АМО проявляло себя в летнее время года, первым этапом запланированного исследования стал анализ июльских значений АМО за 1880–2022 гг. Для последнего периода ряд АМО представляется нам более достоверным по сравнению с рядом для периода 1856–1879 гг., когда плотность метеорологической сети наблюдений была еще недостаточной.

Исходя из изложенных выше результатов [6], особое внимание уделялось квазишестидесятилетнему и квазидевятилетнему циклам, учет которых в каждой из моделей проводился функциями косинуса с выделенными периодами и фазами колебаний.

С одной стороны, в работе [5] было показано, что полный цикл кругооборота воды от субтропического пояса Атлантического океана Южного полушария до полярных широт Северной Атлантики составляет около 62 лет. С другой стороны, генерализированные особенности изменений температуры воды Атлантического океана, выявленные на основе метода анализа сингуллярного спектра (Singular Spectrum Analysis, SSA), указывают на наличие квазишестидесятилетней волны в широтном поясе 55°–66° с. ш. с периодом близким к 66 годам.

Учитывая, что длительность используемой выборки нельзя признать достаточной для корректного определения длительности квазишестидесятилетнего периода, и искающее влияние слабого тренда в изменении АМО в последнее тридцатилетие, вероятно, можно принять длительность квазишестидесятилетнего колебания в интервале 60–70 лет. В качестве примеров в работе рассматривали 62- и 66-летние гармоники освобожденных от линейного тренда данных. Дополнительно методом наименьших квадратов определялась оптимальная компонента квазишестидесятилетней продолжительности. Период такой оптимальной гармоники составил 67 лет.

Рассматривали скользящие окна, равные удвоенному периоду указанных выше квазишестидесятилетних гармоник. В конечном счете, в данном случае в этих окнах строили двухкомпонентные модели, включающие линейный тренд и квазишестидесятилетнюю гармонику. Характерной особенностью рядов АМО явились малые величины линейного тренда.

Для остатков (отклонений) значений АМО от квазишестидесятилетних компонент выявлены короткопериодные гармоники близкие к девятилетней квазицикличности с периодами от 8,3 до 9,7 года. Принимая во внимание этот факт, рассматривали также трехкомпонентные модели, включающие короткопериодную гармонику, близкую по продолжительности к 9 годам.

Кроме того, рассматривали варианты использования других гармоник, определяемых путем разложения в ряд Фурье остатков от квазишестидесятилетнего колебания. Необходимым условием использования таких гармоник принимали требование их максимальной мощности с суммарным вкладом указанных гармоник 50 % от средней мощности сигнала [23, с. 39]. Максимальное число таких гармоник ограничивалось четырьмя.

При выявлении короткопериодных гармоник отдельно рассмотрели варианты использования не только указанных выше скользящих окон, но и укороченных окон, полагая, что использование гармоник на более близких к прогнозируемому году отрезках времени увеличит точность прогноза.

Таким образом, рассмотрели несколько типов моделей:

1) двухкомпонентные модели, включающие линейный тренд и квазишестидесятилетнюю гармонику с использованием скользящих окон длиной 124, 132 и 134 года; при этом в первых двух случаях длину окна фиксировали, а в последнем случае определяли исходя из выявленной оптимальной квазишестидесятилетней косинус-кривой для освобожденных от линейного тренда данных;

2) трехкомпонентные модели с учетом короткопериодных гармоник.

В свою очередь, трехкомпонентные модели были поделены на подтипы двумя разными способами:

а) по принципу отбора гармоник третьей компоненты:

– с использованием одной квазидевятилетней гармоники;

– с использованием набора гармоник с максимальной мощностью;

б) по разновидности скользящих окон для отбора гармоник третьей компоненты:

– с использованием исходного скользящего окна;

– с использованием укороченных скользящих окон.

Для каждого из трех основных периодов (62, 66 и 67 лет) было построено по пять моделей описанных типов. При описании результатов для двухкомпонентных моделей использовали обозначение M1. Сводка обозначений трехкомпонентных гармонических моделей приведена в таблице.

При оценке точности разработанных моделей и сравнении прогнозов по ним с наблюденными данными использовали диаграммы Тейлора [24] – удобный инструмент визуализации и оценки качества моделей. Данные диаграммы широко применяют для оценки моделей, разработанных для изучения климата и других аспектов окружающей среды Земли [25]. Они обеспечивают комплексную оценку путем одновременного рассмотрения нескольких статистических показателей на одной легко интерпретируемой диаграмме.

### Обозначения подтипов трехкомпонентных гармонических моделей АМО

#### Designations of subtypes of three-component harmonic AMO models

Тип скользящего окна при расчете гармоник третьей компоненты	Способ отбора гармоник третьей компоненты	
	Набор гармоник с максимальной мощностью	Одна квазидевятиплетняя гармоника
Исходное окно	M2	M3
Укороченное окно	M4	M5

Каждый из наборов данных (сравниваемых моделей и наблюдений) представляется на диаграмме в виде точки трехкомпонентного поля, отображающей коэффициент корреляции Пирсона ( $\rho$ ) модельных результатов с наблюденными данными, центрированную среднеквадратичную ошибку модели (RMSE,  $E'$ ) и коэффициент собственного стандартного отклонения ( $\sigma$ ). Поскольку наблюденные данные также представлены на диаграмме Тейлора в виде соответствующей контрольной точки, диаграмма помогает оценить, насколько хорошо каждая из моделей воспроизводит наблюдаемые закономерности и изменчивость: степень близости к контрольной точке отражает общую точность модели. Модель, наиболее близкая к контрольной точке, наилучшим образом воспроизводит наблюденные данные. Отметим, что стандартному набору отображаемых оценок ( $\rho$ ,  $E'$  и  $\sigma$ ) отвечает функциональная связь между ними:

$$E'^2 = \sigma_h^2 + \sigma_m^2 - 2\sigma_h\sigma_m\rho, \quad (1)$$

где  $\sigma_h$  и  $\sigma_m$  – стандартные отклонения наблюдений и модельных данных соответственно. Сходство условия (1) с известной теоремой косинусов для расчета длин сторон треугольника:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\varphi,$$

где  $\varphi$  – угол между сторонами  $a$  и  $b$ , позволяет на основе этой геометрической аналогии установить взаимосвязь между четырьмя величинами, лежащими в основе построения диаграммы Тейлора. Соответственно, коэффициенту корреляции  $\rho$  на диаграмме отвечает азимутальный угол модельной точки; центрированная среднеквадратичная ошибка  $E'$  моделируемого поля пропорциональна расстоянию от модельной точки до контрольной точки на оси ОХ; стандартные отклонения  $\sigma_h$  и  $\sigma_m$  наблюдений и модельных данных пропорциональны радиальным расстояниям от начала координат контрольной и модельной точек соответственно.

В работе при построении диаграмм Тейлора использовали специализированный пакет программного обеспечения с открытым исходным кодом [26].

**Результаты и их обсуждение.** Тестирование полученных результатов проводили путем сравнения их с наблюденными данными, а также с простейшими моделями 30-летнего скользящего среднего с правосторонним осреднением (MR, когда среднее для периода значение относится к последнему члену скользящего окна) и центральным (MC, когда среднее для периода значение относится к его середине), в последнем случае происходило уменьшение длины скользящего окна при приближении к конечному сроку наблюдений (2022 г.).

На рис. 1 представлены графики данных моделей АМО с указанием границ разброса значений АМО, определяемых соответствующими скользящими среднеквадратическими отклонениями (СКО).

На рис. 2 изображены диаграммы Тейлора сравнения наблюденных и модельных июньских значений индекса АМО (показатели  $\rho$ ,  $E'$  и  $\sigma$ ) при скользящем окне оптимальной длины (67 лет, а), а также при окнах длины 62 (б) и 66 (в) лет.

Из рис. 2 следует, что прогнозы по моделям MR правостороннего скользящего среднего ожидаются относятся к числу наихудших относительно показателей коэффициента корреляции  $\rho$  и среднеквадратической ошибки  $E'$  независимо от выбора основного периода. Двухкомпонентные модели M1 при учете всех трех показателей ( $\sigma$ ,  $E'$  и  $\rho$ ) также ожидались оказались в числе наихудших моделей во всех трех случаях.

Введение при прогнозировании АМО в модель третьей компоненты с преимущественно короткопериодными членами в большинстве случаев приводит к улучшению качества прогноза. Тем не менее все модели показали заниженные значения среднеквадратического отклонения ( $\sigma_{\text{набл.}} = 0,23$ ): для модели M5 с наилучшими показателями коэффициента корреляции  $\rho$  с наблюденными данными – почти в 2 раза. Исключение составляет модель M3 (рис. 2, б), однако если учесть высокие значения ее среднеквадратических ошибок  $E'$ , а также самые низкие или близкие к ним показатели коэффициента корреляции  $\rho$  с наблюденными данными, то эти варианты прогноза оказались неудовлетворительными.

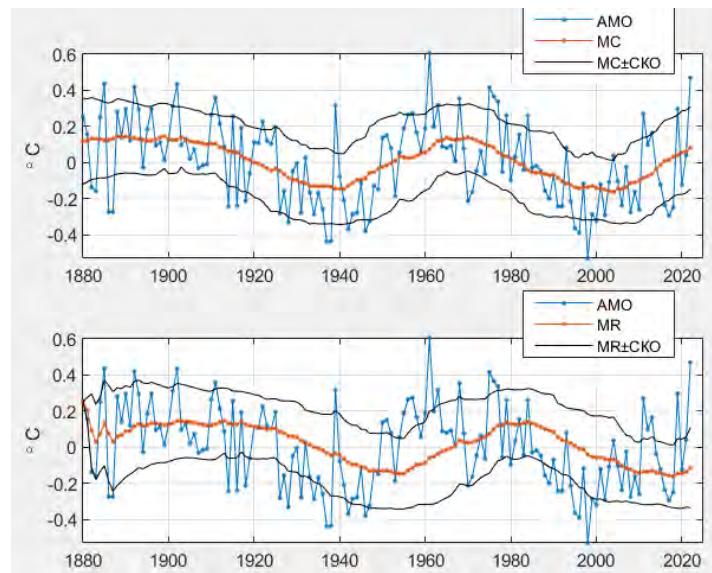


Рис. 1. Исходные значения АМО (июль) и 30-летние скользящие средние осреднения (центральное – вверху и правостороннее – внизу) с соответствующими границами разброса

Fig. 1. Original values of AMO (July) and 30-year moving averages (central – up and right-hand – down) with corresponding scatter boundaries

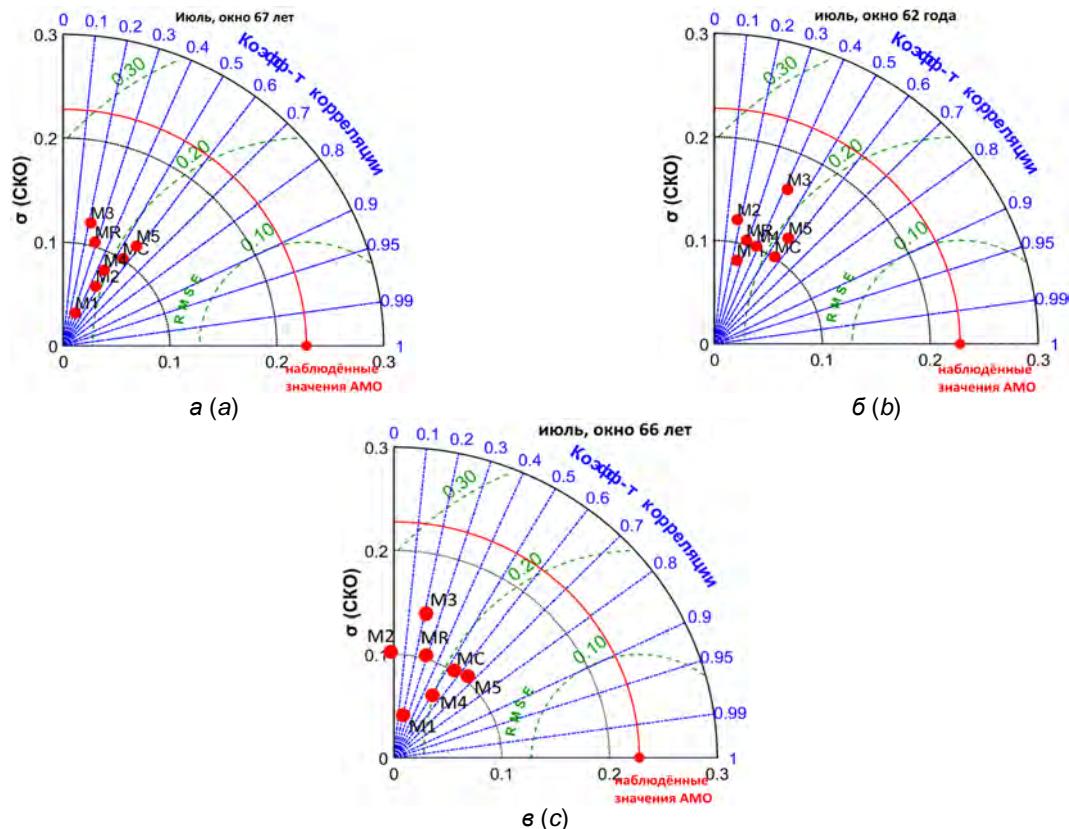


Рис. 2. Диаграммы Тейлора сравнения наблюденных и модельных значений индекса АМО (июль):  
а – модели, включающие оптимизированное 67-летнее колебание;  
б – модели, включающие 62-летнее колебание; в – модели, включающие 66-летнее колебание.  
Обозначения моделей те же, что и в таблице

Fig. 2. Taylor diagrams comparing the observed and model values of the AMO index (July);  
a – models including an optimized 67-year oscillation; b – models including a 62-year oscillation;  
c – models including a 66-year oscillation. The model designations are the same as in Table

Важно отметить, что прогностические свойства моделей, использующих укороченное окно при построении третьей компоненты (M4 и M5), существенно превосходят таковые моделей M2 и M3, работающих на исходной учебной выборке (текущем скользящем окне). Это говорит о важности учета динамики амплитуды и фазировки гармоник третьей компоненты.

Отметим также, что некоторые из указанных моделей занижают прогнозные показатели по сравнению с данными наблюдений, причиной чего может быть отсутствие дополнительного учета линейного тренда на выбранном укороченном окне.

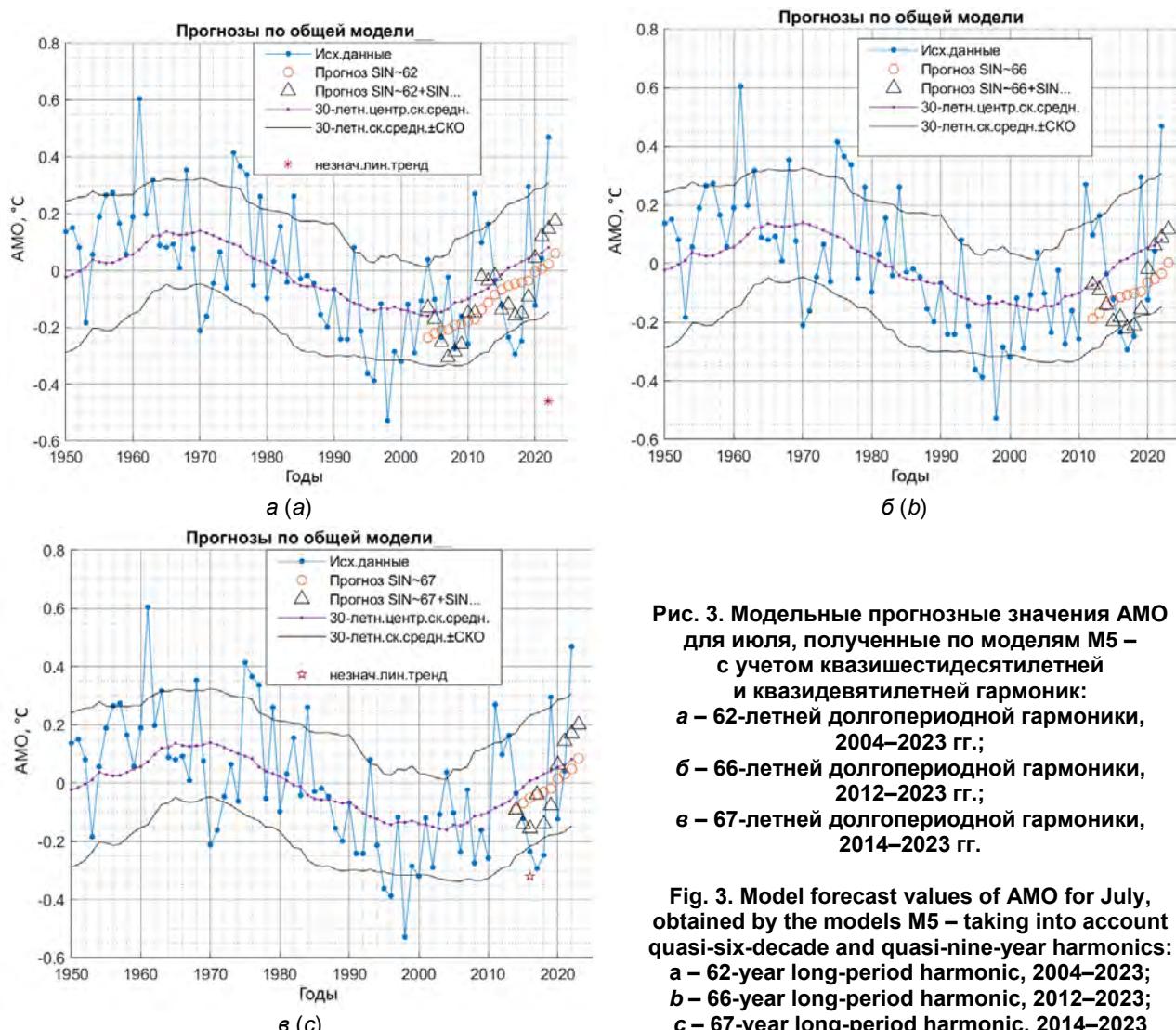
В целом, с учетом всех трех показателей ( $\sigma$ ,  $E'$  и  $\rho$ ) наилучшими моделями оказались трехкомпонентные модели M5 с показателями

$$\rho = 0,58, 0,56, 0,65; \quad E' = 0,20, 0,18, 0,18; \quad \sigma = 0,12, 0,10, 0,12$$

при использовании выявленных квазишестидесятилетних составляющих длительностью 67 (оптимизированная гармоника), 62 и 66 лет соответственно.

Подчеркнем, что все отмеченные модели превосходят показатели модели МС центрального 30-летнего скользящего среднего.

На рис. 3 приведены траектории полученных прогнозных значений согласно отмеченным выше моделям M5. На диаграммах также отмечены результаты соответствующих двухкомпонентных моделей и центрального 30-летнего осреднения (МС) с границами разброса, отвечающими соответствующим скользящим среднеквадратическим отклонениям АМО.



**Рис. 3. Модельные прогнозные значения АМО для июля, полученные по моделям M5 – с учетом квазишестидесятилетней и квазидевятилетней гармоник:**  
**а – 62-летней долгопериодной гармоники, 2004–2023 гг.;**  
**б – 66-летней долгопериодной гармоники, 2012–2023 гг.;**  
**в – 67-летней долгопериодной гармоники, 2014–2023 гг.**

**Fig. 3. Model forecast values of AMO for July, obtained by the models M5 – taking into account quasi-six-decade and quasi-nine-year harmonics:**  
**a – 62-year long-period harmonic, 2004–2023;**  
**b – 66-year long-period harmonic, 2012–2023;**  
**c – 67-year long-period harmonic, 2014–2023**

**Заключение.** Анализ качества моделей показывает, что выбор в качестве третьей компоненты модели одной квазидевятилетней гармоники предпочтительнее набора четырех гармоник с максимальной мощностью. Это свидетельствует о преобладающем влиянии именно квазидевятилетней гармоники в формировании значений АМО. Включение добавочных гармоник служит источником дополнительного «шума» при прогнозировании. В этой связи при использовании компонентно-гармонического метода следует проводить тщательное «просеивание» предикторов. Обилие используемых предикторов не может служить гарантией успешного прогнозирования.

Качество прогнозов моделей, использующих укороченное окно при построении третьей компоненты, существенно выше, чем у моделей, работающих на исходной учебной выборке (текущем скользящем окне). Это указывает на то, что предварительный учет модуляции амплитуды и фазировки гармоник, отобранных для третьей компоненты (в первую очередь квазидевятилетней), также может повысить точность прогноза. Выявленная в наших предыдущих работах [4, 6], а также других работах, обзор которых приведен в работе Б. Г. Шерстюкова [13], дополнительная модуляция амплитуд и фаз короткопериодных колебаний может быть результатом биений близких по длительности восьми- и девятилетних колебаний в климатической системе или определяться действием слабой внешней силы, имеющей космическое происхождение. Дополнительным элементом улучшения оправдываемости прогнозов АМО части из представленных моделей, занижающих прогнозные показатели, может служить учет линейного тренда АМО в выбранном укороченном окне.

#### Список использованных источников

1. Сергин, В. Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли / В. Я. Сергин, С. Я. Сергин. – М. : Гидрометеоиздат, 1978. – 280 с.
2. Шупейкин, В. В. Физика моря / В. В. Шупейкин. – М. : Наука, 1968. – 1083 с.
3. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 315 с.
4. Логинов, В. Ф. Космические факторы климатических изменений / В. Ф. Логинов ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2020. – 168 с.
5. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2021. – 304 с.
6. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – СПб. : Гидротехпроект, 2024. – 267 с.
7. Бышев, В. И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы / В. И. Бышев. – М. : Наука, 2003. – 343 с.
8. О колебаниях глобального климата за последние 150 лет / Н. М. Даценко [и др.] // Доклады Российской Академии наук. – 2004. – Т. 399, № 2. – С. 253–256.
9. Изменения климата Арктики и Антарктики: результат действия естественных причин / Е. И. Фролов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 2 (85). – С. 52–61.
10. Нестеров, Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М. : Триада, 2013. – 144 с.
11. Покровский, О. М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений / О. М. Покровский // Исследования Земли из космоса. – 2010. – № 5. – С. 11–24.
12. Полонский, А. Б. Роль океана в изменениях климата / А. Б. Полонский. – Киев : Наукова думка, 2008. – 183 с.
13. Шерстюков, Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы / Б. Г. Шерстюков. – Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2021. – 221 с.
14. Scafetta, N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature / N. Scafetta // J. Atmos. Sol. Ter. Phys. – 2012. – Vol. 74. – P. 145–163. doi:10.1016/j.jastp.2011.10.013
15. Мусаелян, Ш. А. О природе некоторых сверхдлительных атмосферных процессов / Ш. А. Мусаелян. – Л. : Гидрометеоиздат, 1978. – 142 с.
16. Brocker, W. S. Unpleasant surprises in the greenhouse? / W. S. Brocker // Nature. – 1987. – Vol. 328. – P. 123–126.
17. Schlesinger, M. E. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years / M. E. Schlesinger, N. Ramankutty // Nature. – 1994. – Vol. 367. – P. 723–726.
18. Kerr, R. A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries / R. A. Kerr // Science. – 2000. – Vol. 288, iss. 5473. – P. 1984–1985. doi:10.1126/science.288.5473.1984
19. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991 / A. Kaplan [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Vol. 103, no. C9. – P. 18567–18589.
20. Максимов, И. В. Долгосрочный прогноз многолетних изменений общей ледовитости Баренцева моря, составленный компонентно-гармоническим методом / И. В. Максимов, Н.П. Смирнов, В. Н. Воробьев // Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна. – 1964. – Вып. 4. – С. 73–85.
21. Сazonov, B. I. Солнечно-тропосферные связи / Б. И. Сazonov, В. Ф. Логинов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1969. – 115 с.
22. NOAA Physical Sciences Laboratory. Climate Timeseries. AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO>. – Date of access: 09.07.2024.

23. Джэнкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Джэнкинс, Д. Ваттс. – М. : Мир, 1971. – Вып. 1. – 320 с.
24. Taylor, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram / K. E. Taylor // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106, no. D7. – P. 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719
25. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets [Electronic resource] / G. Tang [et al.] // Remote Sensing of Environment. – Vol. 240. – 2020. – P. 111697. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300663>. – Date of access: 09.07.2024. doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697
26. Rochford, P. SkillMetricsToolbox [Electronic resource] / P. Rochford. – Mode of access: <https://github.com/PeterRochford/SkillMetricsToolbox>. – Date of access: 09.07.2024.

## References

1. Sergin V. Ya., Sergin S. Ya. *Sistemnyj analiz problemy bol'shih kolebanij klimata i oledeneniya Zemli* [System analysis of the problem of large fluctuations in climate and glaciation of the Earth]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 280 p. (in Russian)
2. Shulejkin V. V. *Fizika morya* [Physics of the sea]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 1083 p. (in Russian)
3. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
4. Loginov V. F. *Kosmicheskie faktory klimaticheskikh izmenenij* [Cosmic factors of climate change]. Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi [Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2020, 168 p. (in Russian)
5. Loginov V. F. *Diagnоз global'nogo klimata* [Diagnosis of the global climate]. St. Petersburg, Lema Publ., 2021, 304 p. (in Russian)
6. Loginov V. F. *Sovremennye izmeneniya klimata* [Modern climate change]. Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi [Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus]. St. Petersburg, Hydrotekhproekt Publ., 2024, 267 p. (in Russian)
7. Byshev V. I. *Sinopticheskaya i krupnomasshtabnaya izmenchivost' okeana i atmosfery* [Synoptic and large-scale variability of the ocean and atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 343 p. (in Russian)
8. Dacenko N. M., Monin A. S., Berestov A. A., Ivanchenko N. N., Sonechkin D. M. *O kolebaniyah global'nogo klimata za poslednie 150 let* [On global climate fluctuations over the past 150 years]. Doklady Rossijskoj Akademii nauk = Reports of the Russian Academy of Sciences, 2004, vol. 399, no. 2, pp. 253–256. (in Russian)
9. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Smolyanitsky V. M. *Izmeneniya klimata Arktiki i Antarktiki: rezul'tat dejstviya estestvennyh prichin* [Climate change in the Arctic and Antarctic: result of natural causes]. Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic, 2010, no. 2 (85), pp. 52–61. (in Russian)
10. Nesterov E. S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean* [North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean]. Moscow, Triada Publ., 2013, 144 p. (in Russian)
11. Pokrovskij O. M. *Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distacionnyh i kontaktnyh izmerenij* [Analysis of climate change factors based on remote and contact measurements]. Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Earth exploration from space, 2010, no. 5, pp. 11–24. (in Russian)
12. Polonskij A. B. *Rol' okeana v izmeneniyah klimata* [The role of the ocean in climate change]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008, 183 p. (in Russian)
13. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'nie svyazi, prognozy* [Climate oscillation system, resonances, teleconnections, forecasts]. Obrinsk, All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center Publ., 2021, 221 p. (in Russian)
14. Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature. *J. Atmos. Sol. Ter. Phys.*, 2012, vol. 74, pp. 145–163. doi:10.1016/j.jastp.2011.10.013
15. Musaelyan Sh. A. *O prirode nekotoryh sverhdllitel'nyh atmosfernnyh processov* [On the nature of some ultra-long atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 42 p. (in Russian)
16. Brocker W. S. Unpleasant surprises in the greenhouse? *Nature*, 1987, vol. 328, pp. 123–126.
17. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 1994, vol. 367, pp. 723–726.
18. Kerr R. A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 2000, vol. 288, iss. 5473, pp. 1984–1985. doi:10.1126/science.288.5473.1984
19. Kaplan A., Kaplan A., Cane M., Kushnir Y., Clement A., Blumenthal M., Rajagopalan B. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991. *J. of Geophysical Research*, 1998, vol. 103, no. C9, pp. 18567–18589.
20. Maksimov I. V., Smirnov N. P., Vorobyov V. N. *Dolgosrochnyy prognoz mnogoletnikh izmenenij obshchey ledovitosti Barentseva morya, sostavlenyy komponentno-garmonicheskim metodom* [Long-term forecast of multi-year changes in the total ice cover of the Barents Sea, compiled by the component-harmonic method]. Materialy rybo-khozyaystvennykh issledovanij Severnogo basseyna = Materials of fisheries research in the Northern Basin, 1964, iss. 4, pp. 73–85. (in Russian)
21. Sazonov B. I., Loginov V. F. *Solnechno-troposfern'yе svyazi* [Solar-tropospheric connections]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 115 p. (in Russian)
22. NOAA Physical Sciences Laboratory. Climate Timeseries. AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. Available at: <http://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO> (accessed 9 July 2024).

23. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spektral'nyj analiz i ego prilozheniya* [Spectral analysis and its applications]. Moscow, Mir Publ., 1971. 320 p. (in Russian)
24. Taylor K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, no. D7, pp. 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719
25. Tang G., Clark M. P., Papalexiou S. M., Ma Z., Hong Y. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 240, 111697. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300663> (accessed 9 July, 2024). doi:10.1016/j.rse.2020.111697
26. Rochford P. SkillMetricsToolbox. Available at: <https://github.com/PeterRochford/SkillMetricsToolbox> (accessed 9 July 2024).

#### Информация об авторах

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

#### Information about the authors

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

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

## БЕЗДОЖДНЫЕ ПЕРИОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

М. А. Хитриков, В. И. Мельник, И. В. Буяков

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Целью данного исследования было получение сведений о продолжительности бездождных периодов и числа их случаев за период 1955–2023 гг., а также изменения данных характеристик за период современного потепления (с 1989 г.). Под бездождным периодом понимался период минимальной продолжительностью 10 дней, в течение которого не наблюдалось выпадение осадков или их количество недостаточным для роста и развития растений. Установлено, что средняя продолжительность бездождных периодов и число их случаев за тёплый период года (апрель–октябрь) сохранялись на одном уровне: в среднем наблюдалось 3–4 периода за год, а их средняя продолжительность составляла 16–17 дней. Наиболее значимые изменения за период современного потепления наблюдались для средней из максимальных продолжительностей бездождных периодов: её значения преимущественно выросли на 2–3 дня (на отдельных станциях – до 5 дней). Также необходимо отметить, что на 48 % рассматриваемых станций установлены новые рекорды числа бездождных периодов за тёплый период года (до 9 случаев). При этом абсолютный максимум продолжительности бездождного периода (83 дня) был отмечен в Брагине в 1974 г., и лишь на 28 % рассматриваемых станций рекорды продолжительности были установлены после 1989 г. Период современного потепления также характеризовался трендами на увеличение числа бездождных периодов за тёплый период года и их максимальной продолжительности на большей части территории Беларуси.

**Ключевые слова:** изменения климата; бездождные периоды; засушливые явления; атмосферные осадки; агроклиматические ресурсы.

**Для цитирования.** Хитриков М. А., Мельник В. И., Буяков И. В. Бездождные периоды на территории Беларуси в условиях современного изменения климата // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 14–21.

## RAINLESS PERIODS IN BELARUS UNDER THE CONDITIONS OF MODERN CLIMATE CHANGE

М. А. Khitrykau, V. I. Melnik, I. V. Buyakov

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

**Abstract.** The goal of this study was to investigate the duration of rainless periods and the number of their occurrences for the period of 1955–2023, as well as changes in these characteristics during the period of modern warming (since 1989). A rainless period was defined as a period of minimum duration of 10 days, during which no precipitation was observed or its amount was insufficient for plant growth and development. It was found that the average duration of rainless periods and the number of their occurrences during the warm period of the year (April–October) remained at the same level: 3–4 periods per year were observed on average, and their average duration was 16–17 days. The most significant changes for the period of modern warming were observed for the average of the maximum durations of rainless periods: its values predominantly increased by 2–3 days (at some stations – up to 5 days). It should be also noted that at 48 % of the stations under consideration new records of the number of rainless periods for the warm period of the year (up to 9 cases) were established. The absolute maximum of the duration of the dry period (83 days) was recorded in Brahin in 1974, and only at 28 % of the stations under consideration, the records of duration were established after 1989. The period of modern warming was also characterised by trends for the increase in the number of rainless periods during the warm period of the year and their maximum duration over most of the territory of Belarus.

**Keywords:** climate change; rainless periods; droughts; precipitation; agroclimatic resources.

**For citation.** Khitrykau M. A., Melnik V. I., Buyakov I. V. Rainless periods in Belarus under the conditions of modern climate change. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 14–21.

**Введение.** Важнейшей особенностью периода современного потепления являются изменения многих климатических характеристик, в особенности повторяемости и интенсивности неблагоприятных и опасных явлений погоды. Изменения наблюдаются и для показателей атмосферного увлажнения. Годовые суммы осадков на территории Беларуси в течение длительного периода, включая современный период потепления, изменились незначительно. Статистически незначимое увеличение отмечается в пределах 3–5 % по всей территории страны с наибольшими значениями 5–7 % в северных районах [1]. При продолжающемся устойчивом повышении средних температур [2–5] отмечается перераспределение в характере выпадения осадков на протяжении года: так, зимой и в переходные сезоны наблюдается их незначительное повышение, наиболее выраженное на севере Беларуси [2, 3, 5]. Кроме того, растет экстремальность выпадения осадков: начиная с конца 1980-х годов число дней с осадками интенсивностью более 10 мм/день выросло на 7,5 %, а число дней с осадками интенсивностью более 20 мм/день – на 20 % [6].

Учитывая данные обстоятельства, становится очевидным повышение риска засушливых явлений, которые являются наиболее губительными для растениеводства. Для оценки вероятности развития засух необходимо провести изучение изменений повторяемости и продолжительности бездождей – периодов, когда выпадение атмосферных осадков не отмечалось или их количество было недостаточным для того, чтобы повлиять на влагосодержание почвы. Данное исследование особенно актуально, поскольку последнее комплексное исследование характеристик бездождей в Беларуси проводилось в конце 1980-х годов [7], когда изменения климата еще не были выражены.

Первым этапом нового исследования бездождей в Беларуси стала работа [8]. В целом же исследования бездождных периодов как отдельной характеристики очень редки и в отечественной, и в зарубежной литературе. Они обычно рассматриваются как составная часть засушливых явлений. Можно отметить следующие работы, посвященные изучению бездождных периодов в Словакии [9], где они рассматриваются как фактор почвенной засухи, а также повторяемости бездождей в Сербии [10], где они приравнены к атмосферной засухе. В странах СНГ работы, посвященные бездождным периодам, в последние годы не публиковались.

**Методы и данные исследований.** В настоящей работе для определения бездождных периодов используются критерии, изложенные в работе [7]; согласно ним, под бездождным периодом понимается отрезок времени минимальной продолжительностью 10 дней, в течение которых суточная сумма осадков не превышала 1 мм, а в последующем – с суточной суммой осадков менее 5 мм, если при делении количества осадков на число бездождных дней (после первых 10), получается сумма менее 0,5 мм, так как при данных условиях атмосферные осадки будут неэффективны. Характеристиками бездождей являются их средняя и максимальная продолжительности, а также число случаев за год или сезон.

Бездождные периоды определялись на основе данных о суточных суммах осадков за тёплый период года (апрель – октябрь) начиная с 1955 г. до 2023 г. по 25 метеорологическим станциям Беларуси, имеющим непрерывные ряды данных за указанный период. Под указанное условие попадают следующие станции: Барановичи, Бобруйск, Борисов, Брагин, Брест, Василевичи, Верхнедвинск, Витебск, Вилейка, Волковыск, Гомель, Горки, Гродно, Житковичи, Жлобин, Лида, Марьина Горка, Минск, Могилёв, Новогрудок, Пинск, Полоцк, Пружаны, Славгород и Шарковщина. Это достаточно продолжительный период, позволяющий охватить как период современного потепления, так и предшествующие ему десятилетия. В Беларуси началом потепления является 1989 г. [11], поэтому в данной работе проводилось сопоставление двух периодов: 1955–1988 гг. и 1989–2023 гг. для оценки влияния современного потепления на характеристики бездождей.

Согласно исследованию [7], до начала современного изменения климата средняя продолжительность бездождей на территории Беларуси составляла от 15 дней в Витебской области до 17 дней в Полесском регионе, а всего за тёплый период года отмечалось в среднем 3–4 бездождных периода. Рекорды продолжительности бездождей наблюдались в Волковыске (55 дней) и Пинске (56 дней). В целом подобное распределение средних значений продолжительности бездождей во многом схоже с распределением значений гидротермического коэффициента по Г. Т. Селянинову [12]. Полесье – самый засушливый регион Беларуси, поэтому более продолжительные бездождья там ожидаются. Тот факт, что рекордные значения продолжительности бездождных периодов отмечали на станциях, расположенных в западной части Беларуси, вероятно, связан с особенностями формирования блокирующих антициклонов над территорией восточной и центральной Европы, из-за которых вероятность появления периода с недостаточным количеством осадков выше именно в западной части Беларуси [13–15].

Для оценки изменений характеристик бездождных периодов был проанализирован годовой ход числа случаев бездождей, а также максимальные продолжительности бездождей по годам на четырех станциях: Василевичи, Волковыск, Марьина Горка и Шарковщина, представляющих разные регионы страны. Кроме того, данные станции расположены в малых городах, поэтому там отсутствует искажающий эффект городского острова тепла.

**Результаты и их обсуждение.** Изменения средней и максимальной продолжительностей бездождей представлены в картографической форме на рис. 1, а также осреднённые по административным областям – в табличной форме (см. таблицу) совместно с изменениями числа случаев бездождей за год. Учитывая, что скорость увеличения среднегодовой температуры в 4–5 раз выше скорости повышения годового количества осадков [4], ожидаемо, что климат становится более засушливым, и полученные нами результаты это подтверждают. Бездождные периоды регистрируются всё чаще, и они стали более продолжительными, однако наиболее значимые изменения свойственны экстремальным значениям: прирост средних значений за период современного потепления оказался небольшим и регистрировался не во всех регионах.

Так, согласно полученным нами данным, среднее число бездождей за тёплый период года в Беларуси за весь рассматриваемый период практически не изменилось и составило 3–4 случая, что соизмеримо с данными работы [7]; лишь на станции Брагин в среднем за тёплый период года отмечалось пять бездождных периодов. Как правило на станциях, расположенных в центральной и северной Беларуси, в 1955–1988 гг. число бездождей за тёплый период составляло три, а в Полесском регионе – четыре. В период 1989–2023 гг. на большей части станций центральной Беларуси среднее число бездождей за тёплый период года выросло. Всего же прирост средних значений отмечался на 9 из 25 рассмотренных станций. При осреднении значений получается, что лишь в Гродненской области в 1989–2023 гг. число бездождей за тёплый период года возросло, что может быть связано с сокращением количества осадков в западной Беларуси во время второй фазы современного потепления [2]. При этом следует отметить, что в период 1989–2023 гг. на половине рассматриваемых станций были обновлены рекорды по числу бездождей за тёплый период года, и ещё на семи станциях значения остались на том же уровне. Максимальное число бездождей за тёплый период года – 9 случаев (отмечалось в Брагине в период 1955–1988 гг. и в Гомеле в период 1989–2023 гг.). Такова главная особенность изменения характеристик бездождных периодов в настоящее время: средние значения выросли незначительно по сравнению с периодом, предшествовавшим современному потеплению, однако вероятность развития экстремумов стала выше. Кроме того, следует отметить, что тёплый период года без бездождей – очень редкое явление, которое было зарегистрировано лишь в 0,8 % всех случаев.

**Характеристики бездождных периодов по административным областям Беларуси и их изменения за рассматриваемый период (1955–2023 гг.) с указанием станций, где были зарегистрированы наиболее продолжительные бездождья**

**Characteristics of rainless periods by administrative regions of Belarus over the period under consideration (1955–2023) with names of the stations where the longest rainless periods were recorded**

Регион	Средняя продолжительность, дней	Среднее число случаев за год	Средний максимум продолжительности, дней	Максимальная продолжительность, дней	Максимальное число случаев за год
<i>Период 1955–1988 гг.</i>					
Брестская область	16	4	25	58 (Барановичи)	8
Витебская область	15	3	21	57 (Витебск)	7
Гомельская область	16	4	25	83 (Брагин)	9
Гродненская область	16	3	23	68 (Гродно)	6
Минская область	15	3	21	62 (Вилейка)	7
Могилёвская область	15	4	21	58 (Бобруйск)	7
Беларусь	16	4	23	83 (Брагин)	9
<i>Период 1989–2023 гг.</i>					
Брестская область	16	4	24	52 (Брест, Пинск)	7
Витебская область	16	3	23	69 (Шарковщина)	8
Гомельская область	16	4	25	46 (Брагин)	9
Гродненская область	16	4	23	69 (Волковыск)	8
Минская область	16	3	24	47 (Марьина Горка)	7
Могилёвская область	16	4	23	52 (Бобруйск)	7
Беларусь	16	4	24	69 (Шарковщина)	9

Средняя продолжительность бездождей на территории Беларуси выросла на 1 день: с 15–16 дней в 1955–1988 гг. (что согласуется с данным Гольберга с соавт. [1]) до 16–17 дней в 1989–2023 гг., при этом ни на одной из рассмотренных станций прирост средних значений продолжительности не превышал двух дней. Наибольший прирост средней продолжительности отмечался в Витебской области и смежных с ней регионах, а в Полесье изменения были минимальными. Это согласуется с главной

особенностью современного изменения климата, заключающейся в том, что при продвижении на север масштаб и интенсивность климатических изменений увеличиваются [5]. Снижение средней продолжительности бездождей в 1989–2023 гг. относительно периода 1955–1988 гг. отмечалось на трёх станциях: Гродно, Гомель и Пружаны; величина снижения составила 1 день. Причина этого связана с региональными изменениями режима и количества выпадающих осадков во второй и третьей фазах современного потепления [3, 16]. Изменения средних максимумов продолжительности бездождных периодов на территории Беларуси были неоднородны. На 14 из 25 станций отмечался прирост значений на величину от 2–3 до 5 дней (наибольший прирост отмечался на станциях Минск и Борисов; см. рис. 1), при этом в Полесском регионе эти изменения были менее выражены (прирост составил 1–2 дня). Ещё на четырёх станциях значения средних максимумов бездождных периодов остались неизменными, а на семи наблюдалось их снижение на величину 1–2 дня (наиболее значимое снижение отмечалось в Гродно, и его величина составила 3 дня), которое происходило главным образом в Полесском и Предполесском регионах. Снижение значений средних максимумов продолжительности бездождных периодов в 1989–2023 гг. может быть объяснено региональными особенностями изменения количества осадков, например, их ростом в юго-восточной Беларуси, начиная со второй фазы периода современного потепления, а также локальными особенностями, влияющими на количество выпадающих осадков: характеристики подстилающей поверхности в указанных станциях могут способствовать более обильным осадкам (более 5 мм/сут, что прерывает бездождье) по сравнению с соседними. Произошли изменения и пространственного распределения средних максимумов продолжительности бездождий по территории страны: на территории восточного Предполесья и смежных с ним регионах, а также в западной части Витебской области образовались зоны повышенных значений, что может быть связано с рекордно продолжительными засухами, отмечавшимися в последние десятилетия, такими как события 2002, 2010 и 2018 г. Что касается абсолютных максимумов продолжительности бездождий, то на 16 из 25 рассматриваемых станций рекорды были установлены в период 1955–1988 гг., и лишь на семи из рассмотренных станций рекорды продолжительности бездождий были зафиксированы в период 1989–2023 гг. Кроме того, исторический рекорд продолжительности бездождного периода в 83 дня был установлен в Брагине в 1974 г. (см. рис. 1), ещё до начала выраженного потепления. Это объясняется серией сильных засух в 1960–70-е годы [17], а также тем фактом, что бездождные периоды такой большой продолжительности приурочены к блокирующим антициклонам – явлению нерегулярному; на их характеристики и повторяемость изменение климата не оказало значительного влияния [13–15]. По этой причине нельзя также выделить регион, где бы преобладали абсолютные максимумы, зарегистрированные в период с 1989 г.: они распределены по всей территории страны. Рекордная продолжительность бездождий в период современного потепления (69 дней) отмечалась на станциях Шарковщина в 2002 г. и Волковыск в 2019 г.

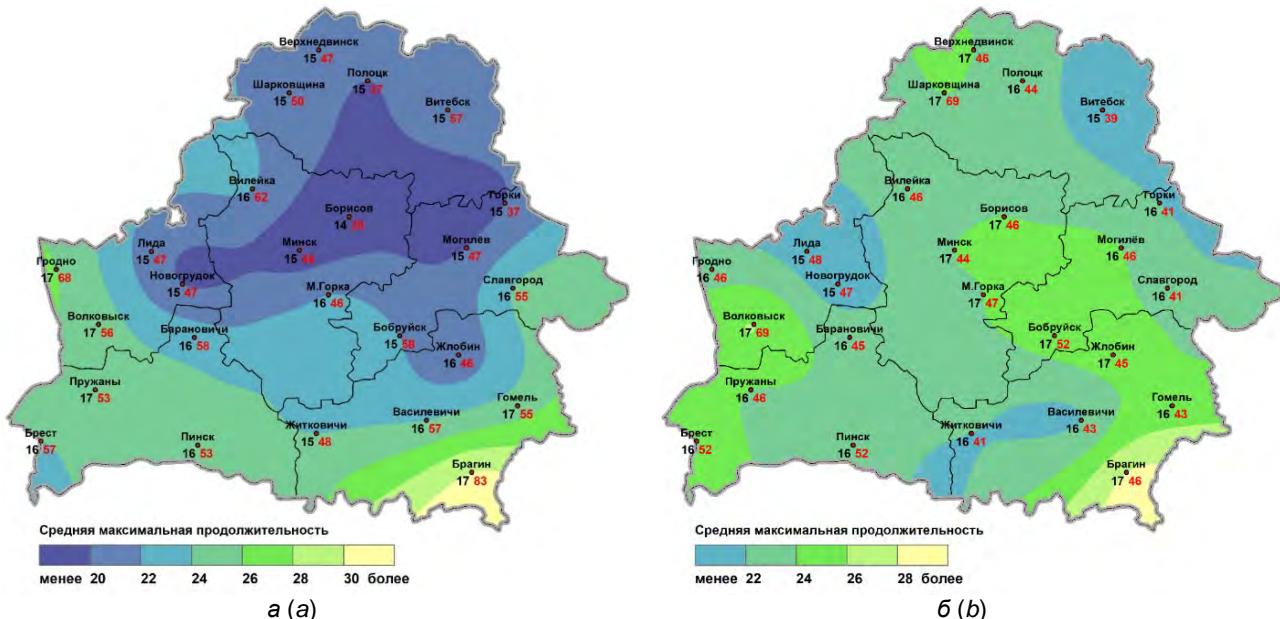
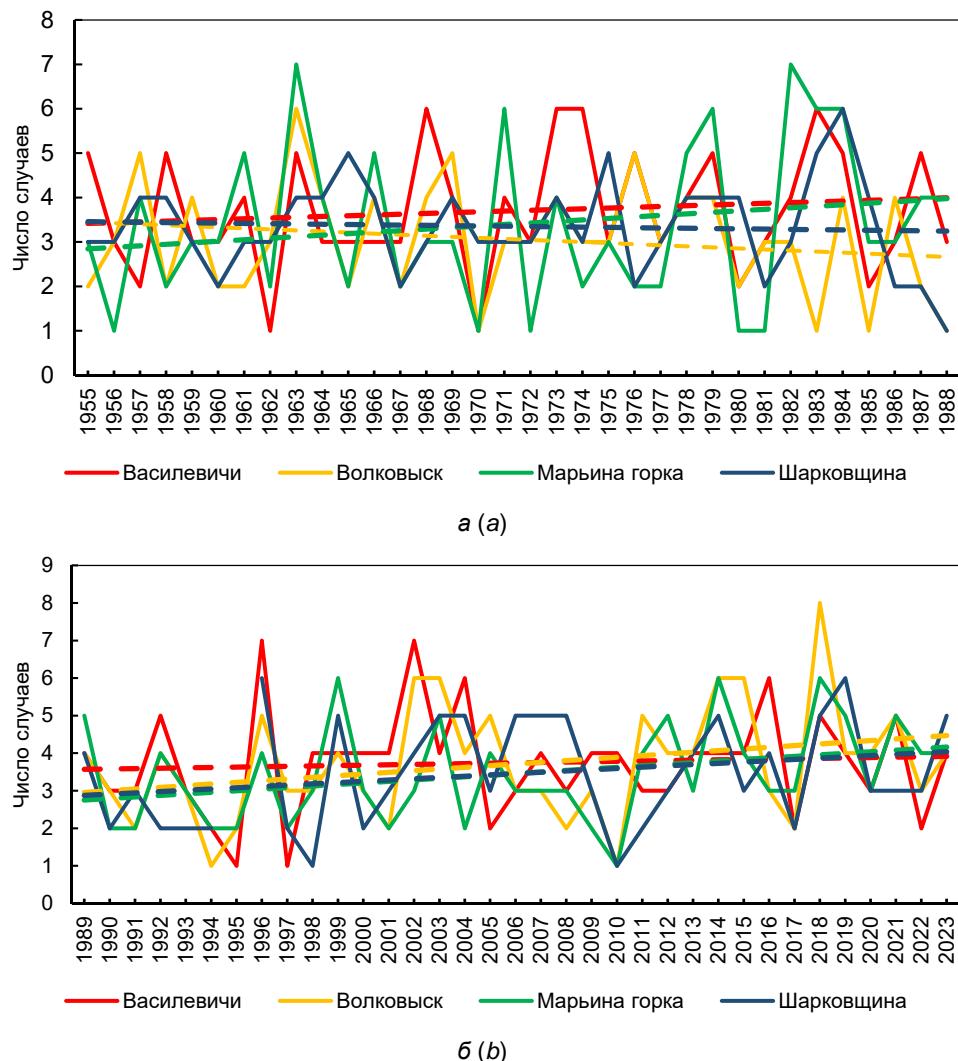


Рис. 1. Значения средней (цифры черного цвета), а также средней и абсолютной максимальной продолжительностей (цифры красного цвета) бездождных периодов в Беларуси за период 1955–1988 гг. (а) и 1989–2023 гг. (б)

Fig 1. Average (black numbers), average and absolute maximal durations (red numbers) of rainless periods in Belarus over the periods 1955–1988 (a) and 1989–2023 (b)

Число случаев бездождных периодов за тёплый период года и их максимальная продолжительность по станциям Василевичи, Волковыск, Марьина Горка и Шарковщина представлены на рис. 2 и 3.

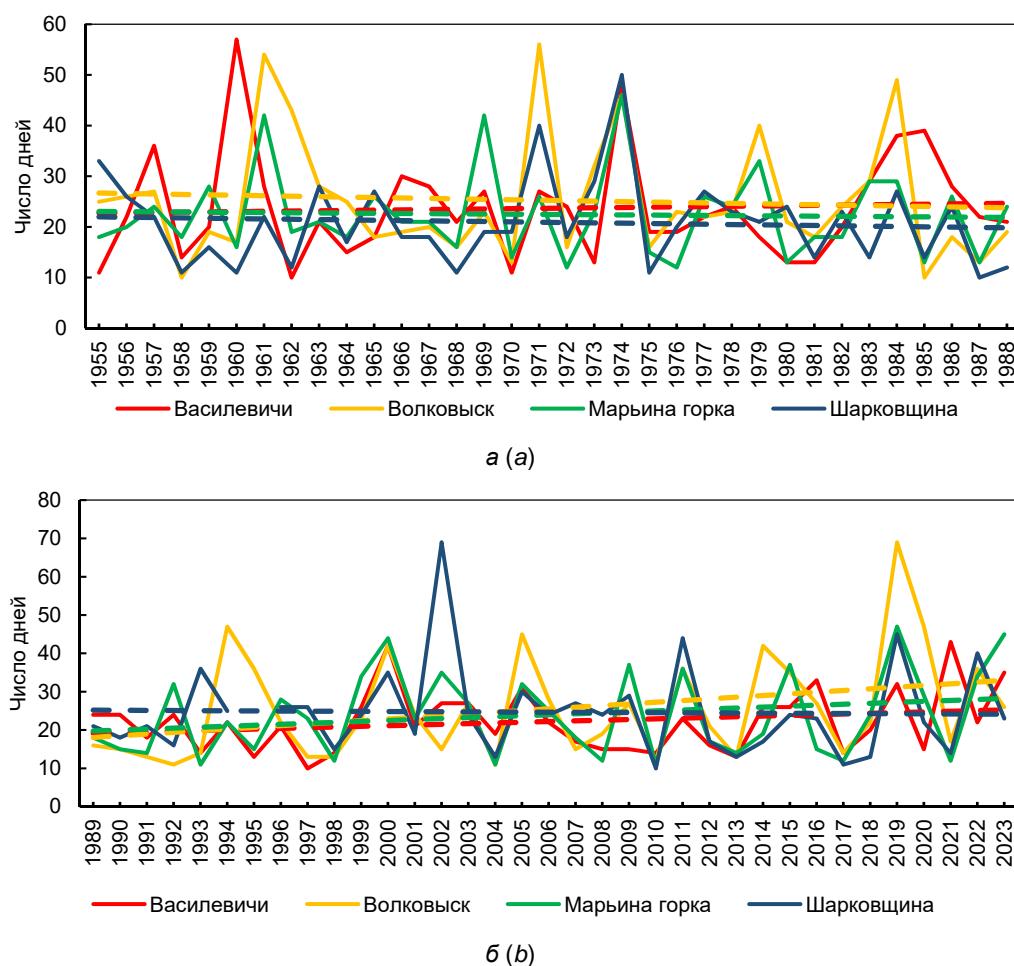


**Рис. 2. Число бездождных периодов за год по станциям Василевичи, Волковыск, Марьина Горка и Шарковщина за периоды 1955–1988 гг. (а) и 1989–2023 гг. (б)**

**Fig 2. Number of rainless periods per year in Vasilevičy, Vaŭkavysk, Mar'ina Horka and Šarkauščyna weather stations over the periods 1955–1988 (a) and 1989–2023 (b)**

Изменения числа бездождных периодов за тёплый период года в 1955–1988 гг. и в 1989–2023 гг. имеют абсолютно разный характер (см. рис. 2). В период, предшествовавший современному потеплению, невозможно выделить общую тенденцию изменения для всей территории Беларуси: так, в Шарковщине число бездождей за тёплый период года оставалось примерно на одном уровне, в Волковыске оно уменьшалось, а в Василевичах и Марьиной Горке росло, причём Марьина Горка из числа рассматриваемых станций оказалась единственной, где рекорд числа бездождей за тёплый период года (7 случаев) был установлен в 1955–1988 гг.; в Шарковщине он остался неизменным (6 случаев). В Василевичах и Волковыске наибольшее число бездождей за тёплый период года (7 и 8 случаев соответственно) было зарегистрировано в период 1989–2023 гг. В период современного изменения климата картина меняется: на большинстве станций наблюдается тренд на рост числа бездождей за тёплый период года, однако в Василевичах этот тренд оказался выраженным очень слабо (он практически остаётся на одном уровне). Причина этого заключается в усилении засушливости климата в тёплый период года в центральной и северной частях страны. Пропуск в ряде данных по станции Шарковщина в 1995 г. связан с тем, что в тёплый период этого года бездождий там зарегистрировано не было.

Тренды максимальной продолжительности бездождных периодов за каждый год в 1955–1988 гг. и 1989–2023 гг. также сильно различаются между собой (см. рис. 3). Так, период, предшествовавший современному потеплению, характеризовался слабым трендом на снижение максимальной продолжительности во всех регионах страны, за исключением восточного Полесья (станция Василевичи), где наблюдался слабый тренд на повышение продолжительности бездождей. Период 1989–2023 гг., как и в случае числа бездождей за год, характеризуется восходящим трендом на большей части территории страны, при этом наиболее выраженный тренд повышения максимальной продолжительности бездождей наблюдался на станции Волковыск. Исключением была станция Шарковщина, где в 1989–2023 гг. тренд не показывал никаких изменений. Эти особенности связаны с региональными различиями в изменении количества и режима выпадения осадков. Также следует отметить, что из четырех рассмотренных станций только в Василевичах максимальная продолжительность бездождя (57 дней) была зарегистрирована в период 1955–1988 гг. В Марьиной Горке (47 дней), Волковыске и Шарковщине (по 69 дней) максимальные значения были зарегистрированы в период 1989–2023 гг.



**Рис. 3. Максимальная продолжительность бездождных периодов по годам на станциях Василевичи, Волковыск, Марьина Горка и Шарковщина за периоды 1955–1988 гг. (а) и 1989–2023 гг. (б)**

**Fig 3. Maximal duration of rainless periods per year in Vasilievichy, Vaŭkavysk, Mar'ina Horka and Šarkauščyna weather stations over the periods 1955–1988 (a) and 1989–2023 (b)**

#### **Выводы.**

1. Изменения термического и влажностного режимов, наблюдаемые в период современного потепления (с 1989 г.), не привели к существенным изменениям средних характеристик бездождных периодов: в течение последних 70 лет их среднее число за тёплый период года (апрель – октябрь) составляет 3–4, а их средняя продолжительность выросла с 15–16 дней в 1955–1988 гг. до 16–17 дней в 1989–2023 гг. Произошло сокращение разности средней продолжительности бездождей между севером и югом Беларуси приблизительно на 1 день.

2. Изменения экстремумов продолжительности и частоты бездождей за год за период современного потепления были более значимыми: на половине из рассматриваемых станций были обновлены рекорды частоты бездождей за тёплый период года (до 9 случаев), значения средних максимумов продолжительности преимущественно возросли на величину до 5 дней (в Полесском регионе – на величину до 2 дней) или остались на том же уровне, а средний максимум продолжительности по всей территории страны вырос с 23 до 24 дней. В то же время рекорды продолжительности бездождей в 1989–2023 гг. были обновлены лишь на 7 из 25 рассматриваемых станций (28 % от всех случаев). Тем не менее в период 1989–2023 гг. на большей части территории Беларуси оформились выраженные тренды на увеличение числа случаев бездождных периодов и их максимальной продолжительности.

3. Учитывая прогнозные показатели изменения климата в Беларуси [2, 3, 5], можно говорить об увеличении продолжительности бездождных периодов и числа их случаев в будущем.

**Благодарности.** Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Х23КУБ-010).

**Acknowledgements.** The research was financially supported by the Belarusian Republic Fund for Fundamental Research.

#### Список использованных источников

1. Данилович, И. С. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси / И. С. Данилович, В. Ф. Логинов // Центральноазиатский журнал климатических исследований. – 2021. – № 1–2. – С. 35–48.
2. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – СПб. : Гидротехпроект, 2024. – 267 с.
3. Логинов, В. Ф. Современные изменения регионального и глобального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 314 с.
4. Хитриков, М. А. Оценка изменений и прогноз биоклиматического потенциала территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.03.08 / М. А. Хитриков ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2021. – 24 с.
5. Логинов, В. Ф. Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
6. Логинов, В. Ф. Изменения характеристик увлажнения на территории Беларуси в 1955–2019 гг. / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков // Природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 78–93.
7. Гольберг, М. А. Опасные явления погоды и урожай / М. А. Гольберг, Г. В. Волобуева, А. А. Фалей. – Минск : Ураджай, 1988. – 120 с.
8. Хитриков, М. А. Бездождные периоды на территории Белорусского Полесья за период 2000–2022 гг. / М. А. Хитриков, В. И. Мельник // Прыроднае асяроддзе Палесся і навукова-практычныя аспекты рацыянальнага рэсурсакарыстання : зб. навук. прац XI Міжнар. навук. канф., Брэст, 11–13 вер. 2024 г. / Нац. акад. навук Беларусі, Палес. аграр.-экалаг. ін-т ; рэдкал.: М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брэст : Альтэрнатыва, 2024. – С. 96–99.
9. Analysis of non-rainfall periods and their impact on the soil water regime [Electronic resource] / M. Gomboš [et al.]. – Mode of access: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82399>. – Date of access: 03.10.2024.
10. Srdjevic, B. Stochastic processes of extreme rainless periods in Serbia / B. Srdjevic, Z. Srdjevic, P. Benka // International Journal of Climatology. – 2020. – Vol. 41, iss. S1. – Р. E1119–1136.
11. Мельник, В. И. Влияние изменения климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность основных сельскохозяйственных культур Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23 / В. И. Мельник ; Бел. гос. ун-т. – Минск, 2004. – 21 с.
12. Нацыянальны атлас Беларусі / Камітэт па зямельных ресурсах, геадэзіі і картографіі пры Савеце Міністэрства Рэсп. Беларусь ; рэдкал.: М. У. Мясніковіч [і інш.]. – Мінск : Белкартографія, 2002. – 292 с.
13. Пространственно-временные изменения циклогенеза и режима осадков в Атлантико-Европейском секторе в 1979–2019 гг. / И. С. Данилович [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2024. – № 5. – С. 17–30.
14. Tomczyk, A. M. Heat waves in Central Europe and their circulation conditions / A. M. Tomczyk, E. Bednorz // International Journal of Climatology. – 2016. – Vol. 36. – Р. 770–782.
15. Strong heat and cold waves in Poland in relation with the large-scale atmospheric circulation / A. M. Tomczyk [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. – 2019. – Vol. 137. – Р. 1909–1923.
16. Логинов, В. Ф. Сезонные особенности изменения климата Беларуси / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка // Природопользование. – Минск, 2014. – Вып. 25. – С. 16–22.
17. Логинов, В. Ф. Экстремальные климатические явления: пространственно-временные закономерности их изменений и предпосылки прогнозирования / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка. – Минск : Бел НИЦ «Экология», 2012. – 132 с.

## References

1. Danilovich I. S., Loginov V. F. *Tekuschie i ozhidayemye izmeneniya klimata na territorii Belarusi* [Current and expected climate changes over the territory of Belarus]. *Central'noaziatskiy zhurnal klimaticheskikh issledovaniy = Central Asian J. of the Geographical Researches*, 2021, no. 1–2, pp. 35–48. (in Russian)
2. Loginov V. F. *Sovremennye izmeneniya klimata* [Modern climate changes]. Saint Petersburg, Gidrotekhproekt Publ., 2024, 267 p. (in Russian)
3. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya regional'nogo i global'nogo klimata* [Modern changes in regional and global climate]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2019, 314 p. (in Russian)
4. Khitrykau M. A. *Ocenka izmeneniy i prognoz bioklimaticeskogo potenciala Belarusi* [Estimation of changes and forecast of bioclimatic potential of Belarus. PhD geogr. sci. abstract diss.]. Minsk, 2021, 24 p. (in Russian)
5. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and regulatory opportunities]. Minsk, Enciklopediks Publ., 218 p. (in Russian)
6. Loginov V. F., Khitrykau M. A. *Izmeneniya kharakteristik uvlazhneniya na territorii Belarusi* [Changes in humidification characteristics on the territory of Belarus in 1955–2019]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2020, no. 2, pp. 78–93. (in Russian)
7. Gol'berg M. A., Volobuyeva G. V., Faley A. A. *Opasnye yavleniya pogody i urozhay* [Weather hazards and crop harvest]. Minsk, Uradzhay Publ., 1988, 120 p. (in Russian)
8. Khitrykau M. A., Mel'nik V. I. *Bezdozhdnye periody na territorii Belorusskogo Poles'ya za period 2000–2022 gg.* [Rainless periods on the territory of Belarusian Polesie in 2000–2022]. *Zbornik navykovych prac XI Mižnarodnej konf'rencyi "Pryrodnae asiaroddzie Paliessia i navukova-praktyčnja aspekti racyjanalnaha resursakarystannia"* [Proc. XI Int. sci. conf. "Natural environment of Polesie and scientific-practical aspects of rational use of resources"]. Brest, 2024, pp. 96–99. (in Russian)
9. Gomboš M., Kandra B., Tall A., Pavelková A. Analysis of Non-Rainfall Periods and Their Impact on the Soil Water Regime. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82399> (accessed November 3, 2024).
10. Srdjevic B., Srdjevic Z., Benka P. Stochastic processes of extreme rainless periods in Serbia. *Int. J. of Climatology*, 2020, vol. 41, iss. S1, pp. E1119–1136.
11. Mel'nik V. I. *Vliyanie izmeneniya klimata na agroklimaticheskie resursy i produktivnost' osnovnykh sel'skohozyaystvennykh kul'tur Belarusi* [Effect of climate warming on the agroclimatic resources and productivity of main crops in Belarus. PhD geogr. sci. abstract diss.]. Minsk, 2004, 21 p. (in Russian)
12. *Nacyjanal'ny atlas Belarusi* [National atlas of Belarus]. Minsk, Belkartahrafija Publ., 2002, 292 p. (in Belarusian)
13. Danilovich I. S., Akperov M. G., Beganskiy A. V., Dembickaya M. A. *Prostranstvenno-vremennye izmeneniya ciklogenese i rezhima osadkov v Atlantiko-Europeyskom sektore v 1979–2019 gg.* [Spatiotemporal Changes in Cyclogenesis and Precipitation Regime over the Euro-Atlantic Sector in 1979–2019]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2024, no. 5, pp. 17–30. (in Russian)
14. Tomczyk A. M., Bendorz E. Heat waves in Central Europe and their circulation conditions. *Int. J. of Climatology*, 2016, vol. 36, pp. 770–782.
15. Tomczyk A. M., Bednorz E., Pórolniczak M., Kolendowicz L. Strong heat and cold waves in Poland in relation with the large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 137, pp. 1909–1923.
16. Loginov V. F., Brovka Y. A. *Sezonnye osobennosti izmeneniya klimata Belarusi* [Seasonal features of climate changes in Belarus]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2014, iss. 25, pp. 16–22. (in Russian)
17. Loginov V. F., Brovka Y. A. *Ekstremal'nye klimaticheskie yavleniya: prostranstvenno-vremennye zakonomernosti ikh izmeneniy i predposyalki prognozirovaniya* [Extreme climatic phenomena: spatial and temporal patterns of their changes and preconditions for forecasting]. Minsk, 2012, 132 p. (in Russian)

### Информация об авторах

**Хитриков Максим Александрович** – кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: m.a.hitrykau@gmail.com

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

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

### Information about the authors

**Maksim A. Khitrykau** – 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: m.a.hitrykau@gmail.com

**Victar I. Mel'nik** – 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: v.melnik2016@mail.ru

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

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВТОРЯЕМОСТИ ОЧЕНЬ СИЛЬНОГО ВЕТРА В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

М. В. Лукша, А. А. Новик

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В работе проведен анализ очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года на территории Беларуси. Построены карты пространственного распределения случаев очень сильного ветра. Представлены повторяемость и тенденции развития опасного гидрометеорологического явления в условиях изменяющегося климата. Результаты проведенных исследований показали, что наиболее часто очень сильный порывистый ветер фиксируется в северо-западных и восточных регионах страны, особенно в последнее десятилетие. Помимо физико-географических условий, оказывающих влияние на пространственно-временное распределение исследуемого явления, определены приземные синоптические, высотные аэрологические факторы, способствующие усилению ветра до очень сильного. Полученные результаты могут быть использованы для разработки природоохранных мероприятий с целью снижения негативных последствий от опасных явлений погоды.

**Ключевые слова:** очень сильный (шквалистый) ветер; холодный период года; приземные синоптические условия; высотные аэрологические условия.

**Для цитирования:** Лукша М. В., Новик А. А. Пространственно-временное распределение повторяемости очень сильного ветра в холодный период года на территории Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 22–32.

## SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF VERY STRONG WIND FREQUENCY OF OCCURRENCE IN THE COLD SEASON OF THE YEAR IN THE TERRITORY OF BELARUS

M. V. Luksha, A. A. Novik

*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The study analyzes very strong (including squally) winds during the cold season in the territory of Belarus. The main meteorological conditions for the development of a hazardous hydrometeorological phenomenon from November to March have been determined based on the processing of data from the network of hydrometeorological observations of Belarus for the period 1989–2022, when the country has a steady increase in air temperature, especially during the cold season. Maps of the spatial distribution of cases of very strong wind have been constructed. The recurrence and development trends of a hazardous hydrometeorological phenomenon in a changing climate are presented. The results of the conducted studies have shown that very strong gusty winds are most often recorded in the northwestern and eastern regions of the country, and there has also been an increase in the number of hazardous hydrometeorological phenomena in the last decade. In addition to the physical and geographical conditions of weather stations that affect the spatial and temporal distribution of the phenomenon under study, surface synoptic, high-altitude aerological factors contributing to the strengthening of the wind to the criteria of very strong are determined. The revealed patterns of spatial and temporal distribution can be used to develop environmental protection measures in order to reduce the negative consequences of hazardous weather phenomena, and the established links between the considered hazardous hydrometeorological phenomenon and the aerosynoptic conditions of its formation can be used to replenish the methodological base on forecasting very strong (including squally) winds in the cold season.

**Keywords:** very strong (squally) wind; cold season; surface synoptic conditions; high-altitude aerological conditions.

**For citation:** Luksha M. V., Novik A. A. Spatial and temporal distribution of very strong wind frequency of occurrence in the cold period of the year in the territory of Belarus. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 22–32.

**Введение.** Случаи возникновения очень сильного ветра (мгновенная скорость ветра (порывы) 25 м/с и более) относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям (ОЯ) [1].

Поскольку данная работа является продолжением исследований, связанных с анализом конвективных явлений холодного периода года, в статье рассматриваются случаи не только градиентного, но и шквалистого ветра [2–5]. Шквалом называется резкое в течение короткого времени увеличение скорости ветра на 8 м/с и более, сопровождающееся изменением его направления в результате развития кучево-дождевой облачности.

Прогнозирование очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, имеющего тенденцию к увеличению числа случаев в условиях изменяющегося климата, является важной проблемой в сфере оперативного обеспечения метеорологической безопасности страны.

Проблемами изучения процессов формирования очень сильного порывистого ветра и шквалов в холодный период года занимался ряд белорусских (В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока, Е. Н. Сумак, И. С. Данилович и др.) и зарубежных ученых (Ю. И. Юсупов, А. А. Алексеева и др.).

Исследования В. Ф. Логинова, А. А. Волчека, И. Н. Шпока позволили установить, что с октября по февраль шквалы на территории Беларуси регистрируются редко (1–2 случая в 15–20 лет). Так, за 30-летний период (1975–2005 гг.) шквалы регистрировались 2 раза (1975, 1993 г.) в январе, 3 раза (1974, 1983, 1995 г.) – в декабре, 4 раза (1974, 1979, 1993, 1997 г.) – в феврале. С марта по сентябрь повторяемость шквалов возрастает в среднем до 4–6 случаев в год [6–9]. Низкая повторяемость шквалов, в особенности очень сильных шквалов, в холодный период года подтверждается результатами данного исследования.

В. Ф. Логиновым установлено, что уменьшение среднегодовой скорости ветра с 1970-х гг. составило от 3,6 до 2,9 м/с [10]. Исследованиями И. С. Данилович и И. В. Костюченко выявлено, что среднегодовая скорость ветра в период с 1989 по 2020 г. продолжает снижаться на 0,9–1,0 м/с. При этом уменьшение сезонных показателей средней скорости ветра составляет 0,6–1,2 м/с, максимальной – 2,5–3,5 м/с. Вместе с тем максимальный порыв ветра снизился в зимний период на 1–5 м/с, но увеличился летом на 1–3 м/с [11].

Согласно исследованию изменения климата (1903–2012 гг.), экстремальных погодных и климатических явлений и их связи с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому, проведенному В. Ф. Логиновым, Ю. А. Бровкой, В. С. Микуцким, в ближайшее время должно снижаться количество ОЯ, так как происходит тенденция уменьшения числа дней с меридиональной южной циркуляцией [12].

Е. Н. Сумак и И. Г. Семёнова осуществили исследование циклонической активности и повторяемости ОЯ над территорией Беларуси (1995–2015 гг.). Ими установлено, что неблагоприятные и опасные гидрометеорологические явления вызывали лишь циклонические вихри южных и западных траекторий, которые выходили интенсивными и активными, как правило, достигая максимальной стадии своего развития на территории Беларуси и вызывая неблагоприятные и опасные гидрометеорологические явления, в том числе грозы, сильные ливни, снегопады, шквалистый ветер [13].

На территории Российской Федерации современные исследования по данной проблеме проводились Ю. И. Юсуповым. Им разработан прогноз шквалов и интенсивных осадков, в том числе и для холодного периода, с использованием векторной фронтогенетической функции и изэнтропического потенциального вихря Эртеля в состоянии насыщения с использованием расчетов по выходной информации мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW [14]. Ученые А. Н. Неижмак и И. П. Растворгувеев участвовали в разработке методики прогноза конвективных ОЯ по комплексу спутниковых и аэрологических данных [15]. А. А. Алексеева занималась вопросами разработки прогноза сильных шквалов на европейской территории России и их идентификации доплеровскими радиолокаторами [16].

Также российскими учеными С. О. Дементьевой, Н. В. Ильиной, М. В. Шаталиной предложен метод прогноза опасных конвективных явлений, основанный на анализе расчетных пространственно-временных распределений радиолокационной отражаемости явлений и сравнении их с характерными параметрами мощных конвективных явлений с заблаговременностью 24 ч на основе мезомасштабной негидростатической численной модели WRF-ARW. Авторы исследования пришли к выводу, что данный метод позволяет добиться лучшей успешности прогноза, чем при использовании индексов неустойчивости атмосферы [17].

Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции над Европейской территорией России (ETP) с помощью модели WRF-ARW, проведенные Н. Ф. Вельтищевым и В. Д. Жупановым, показали, что расчеты на более мелких сетках позволяют воспроизводить обильные ливневые осадки и зоны сильных ветров в районах интенсивной конвекции. При этом наиболее слабым местом является прогноз положения очагов конвекции [18, 19].

В настоящее время в оперативной практике метеорологических подразделений Беларуси не существует разработанных методик прогнозирования порывистого ветра [20], а лишь применяются результаты расчетов численных моделей (GFS, COSMO, UKMO, WRF и ICON).

Отсутствие разработанных алгоритмов и методик прогноза таких опасных гидрометеорологических явлений, как очень сильный (в том числе шквалистый) ветер, связанных преимущественно с фронтальной деятельностью (в том числе с кучево-дождевой облачностью) и имеющих тенденцию к увеличению их количества в условиях изменяющегося климата, подтверждает актуальность выбранной проблемы исследования, в частности, в области качественного метеорологического обеспечения страны своевременными прогнозами погоды и штормовыми предупреждениями. Решение данных вопросов играет важную роль в предотвращении возможных ущербов в различных отраслях экономики и безопасности жизни населения страны.

Анализ изученности рассматриваемой проблемы показал, что имеющиеся на территории Республики Беларусь работы по пространственно-временному исследованию опасных гидрометеорологических явлений требуют уточнений на современном этапе изменения климата. Вместе с тем повторяемость ОЯ холодного периода года определяется не только синоптической ситуацией, но и свойствами подстилающей поверхности. В связи с этим целью данного исследования стал анализ особенностей пространственно-временного распределения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года на территории Республики Беларусь и аэросиноптических условий его формирования.

Отсутствие сформированных методик прогноза очень сильного порывистого (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года в Беларуси и недостаточная освещенность рассматриваемого вопроса для условий изменяющегося климата на территории республики свидетельствуют о его теоретической значимости, а именно о необходимости пополнения методической базы по вопросам прогнозирования ОЯ в холодный период года.

**Материалы и методы исследования.** На основании анализа архивных метеорологических данных Белгидромета проведена статистическая обработка данных числа случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март за период с 1989 по 2022 г. в виде таблиц метеорологических наблюдений на станциях и постах – ТМС за холодный период с 1989 по 2022 г. [21]. При анализе определены приземные метеорологические условия (температура воздуха, барические тенденции, скорость и направление ветра, облачность и явления погоды, в том числе количество выпавших осадков и ухудшение видимости в них), при которых отмечался очень сильный порывистый (в том числе шквалистый) ветер.

В качестве начала выборки был взят 1989 г., так как именно с этого года на территории Беларуси регистрируется самый продолжительный период потепления за весь период инструментальных наблюдений на протяжении последних 130 лет (среднегодовая температура в стране выросла на 1,2 °C за последние 30 лет) [22, 23]. При этом отмечается особенно резкое повышение зимних температур. Так, например, согласно данным Белгидромета, средняя температура воздуха в период декабрь 2021 г. – февраль 2022 г. составила –1,8 °C, что на 1,6 °C выше климатической нормы [24].

Далее по результатам анализа исходной информации было осуществлено картирование особенностей пространственного распределения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра по территории Республики Беларусь, определены физико-географические условия возникновения ОЯ, а также временные тенденции ОЯ в условиях изменяющегося климата.

На следующем этапе проведен анализ приземных карт погоды на базе бумажных и электронных архивных данных Белгидромета [21], отобранных за ту же дату и синоптический срок, когда были отмечены случаи возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года с целью определения синоптических условий формирования ОЯ с ноября по март (барические образования и их стадии развития, атмосферные фронты).

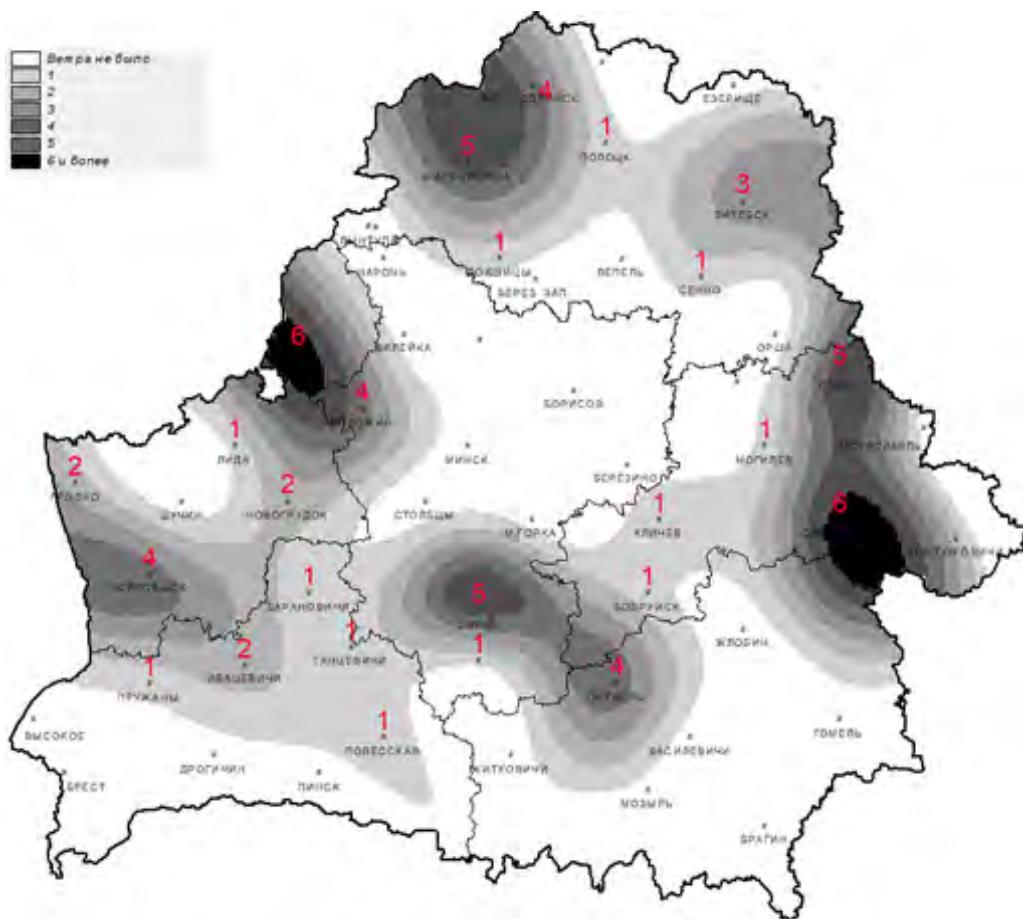
Посредством использования аэрологических диаграмм, полученных по данным реанализа ERA5 с помощью бесплатной интернет-платформы ThundeR [25], выявлены высотные аэрологические факторы (высота верхней и нижней границы облачности, температура воздуха и дефицит точки росы на уровне изобарической поверхности AT-850, скорость и направление ветра на уровнях AT-700, AT-500 и AT-300, индексы неустойчивости атмосферы), которые способствовали возникновению очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март.

При выполнении работы были использованы следующие методы:

- статистический метод для обработки многолетних рядов метеорологических данных;
- метод синтеза и анализа исходной аэросиноптической информации;
- картографический метод для определения пространственного распределения ОЯ по территории Республики Беларусь;
- метод наблюдений и личного опыта работы в сфере синоптической метеорологии;
- метод моделирования синоптических ситуаций для прогноза опасных гидрометеорологических явлений холодного периода года.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ повторяемости очень сильного (в том числе шквалистого) ветра показал, что за холодный период 1989–2022 гг. на территории Республики Беларусь было зафиксировано 66 случаев ОЯ. При этом 50 % случаев пришлось на усиление ветров западного, 36 % – северо-западного и 14 % – юго-западного направления. Порывы ветра достигали 25–32 м/с. Стоит отметить, что шквалистое усиление ветра до критериев очень сильного порывистого было зафиксировано единожды (14 января 2022 г. на метеостанции Воложин).

При этом в разрезе областей 16 случаев очень сильного ветра было зафиксировано в Могилёвской области, 15 случаев – в Витебской, 15 случаев – в Гродненской, 10 случаев – в Минской, 6 случаев – в Брестской и 4 случая – в Гомельской области (рис. 1).



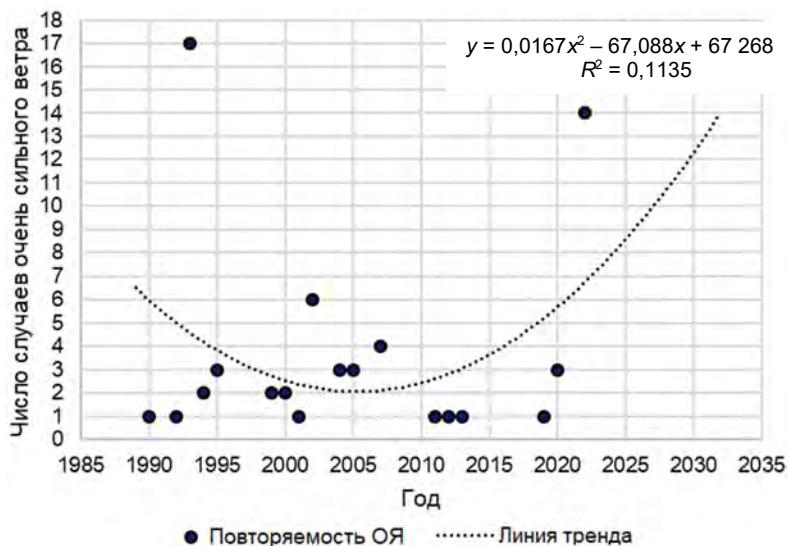


Рис. 2. Повторяемость случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, наблюдавшихся в Беларусь за холодный период 1989–2022 гг., и временные тенденции

Fig. 2. The frequency of cases of very strong (including squally) winds observed in Belarus during the cold season 1989–2022 and temporary trends

В разрезе областей за последнее десятилетие заметное увеличение числа случаев возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра наблюдалось на территории Гродненской области (47 % случаев). Для Витебской области, наоборот, была характерна тенденция уменьшения количества исследуемого ОЯ (79 % случаев зафиксировано в холодный период 1989–2000 гг.). Для остальных областей Республики Беларусь было характерно равномерное распределение фактов возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в течение рассматриваемого промежутка времени.

Во временном разрезе холодного периода года 38 случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было отмечено в январе, 12 случаев – в феврале, 9 случаев – в марте, 6 случаев – в ноябре и 1 случай – в декабре. Такое распределение усиления ветра до критериев очень сильного порывистого (в том числе шквалистого) объясняется особенностями атмосферной циркуляции над территорией нашей страны.

Что касается приземных синоптических условий формирования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март 1989–2022 гг., то они определялись не только плотным барическим градиентом, но и развитием кучево-дождевой облачности, усилением динамического фактора при прохождении фронтальных разделов, а именно основного холодного фронта (37 случаев), холодного фронта с волнами (5), вторичных холодных фронтов (17) и фронтов окклюзий (7 случаев).

Вместе с тем анализ приземных метеорологических условий показал, что до прохождения атмосферных фронтов отмечалось падение атмосферного давления, которое после их прохождения сменялось активным ростом, что свидетельствовало о наличии барических градиентов в атмосфере, усугубляющихся динамическим фактором в результате смещения фронтальных разделов.

Усиление ветра до критериев очень сильного порывистого отмечалось в основном в диапазоне слабоположительных температур (0... +6 °C), поэтому в 65 % случаев сопровождалось ливневым дождем. При температурах близких к 0°C осадки выпадали в смешанном (15 %) или твердом (8 %) виде. При активном развитии атмосферных процессов дожди сопровождались грозами и выпадением снежной крупы. В 12 % случаев усиление ветра до критериев очень сильного порывистого осадками не сопровождалось.

Атмосферные фронты были связаны с ложбинами активных глубоких циклонов, в основном западных траекторий (59 случаев). 7 случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было зафиксировано при прохождении фронтальных разделов от ныряющих циклонов. Циклоны смещались, как правило, в стадии максимального развития. При этом давление в центре циклонов колебалось от 954 до 995 гПа (исключение: случай 17–18 ноября 2000 г. в Славгороде – 1007 гПа).

На рис. 3 в качестве типичной синоптической ситуации, характерной для возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, представлен случай 14 января 2022 г., когда в результате прохождения холодного фронта от западного циклона FAMKE произошло усиление ветра порывами 26–32 м/с на метеостанциях Воложин, Ошмяны, Новогрудок, Полесская, Горки, Могилёв, Славгород и Октябрь.

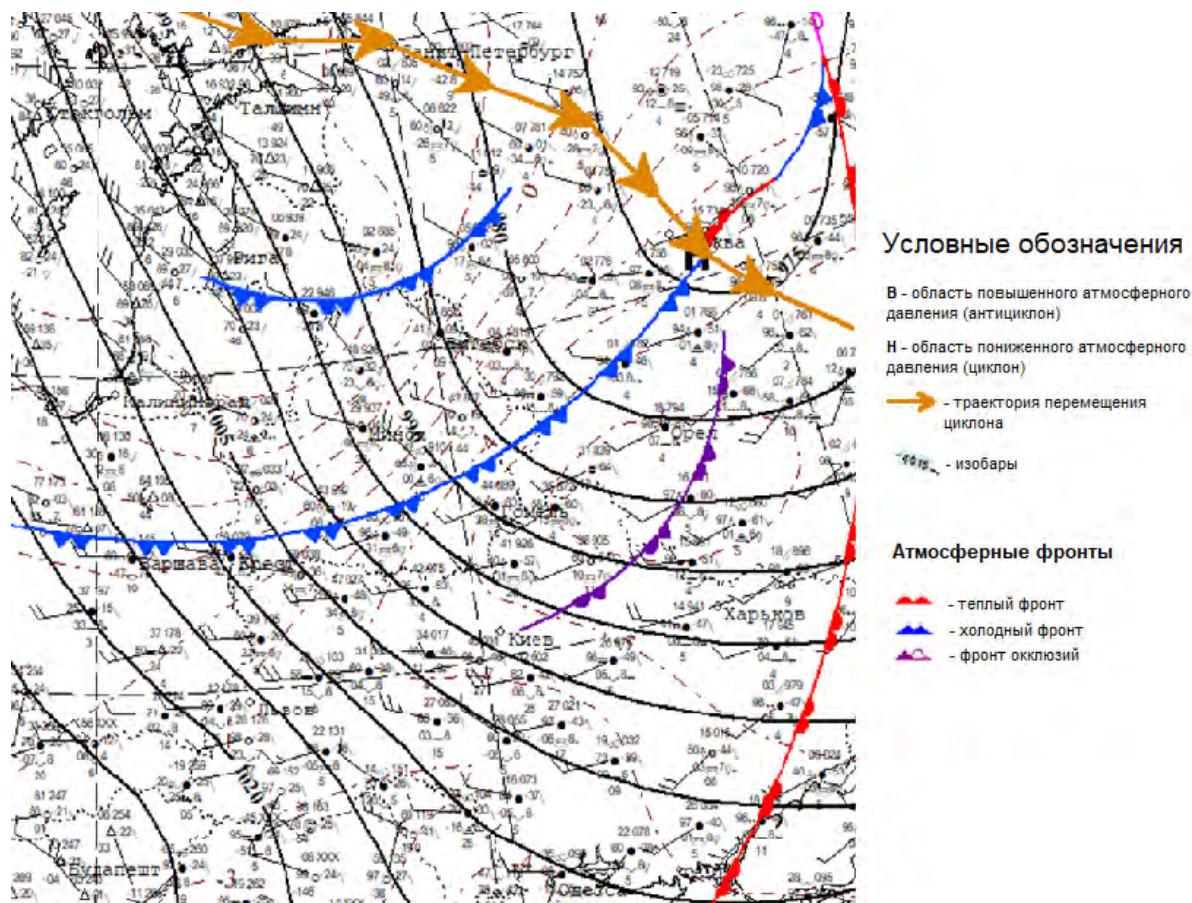


Рис. 3. Приземная карта погоды за 12 UTC 14 января 2022 г. и траектория перемещения циклона FAMKE

Fig. 3. Surface weather map for 12 UTC on January 14, 2022 and the trajectory of Cyclone 'FAMKE'

Циклон FAMKE сформировался 13 января 2022 г. на волновом возмущении холодного атмосферного фронта от обширного североатлантического циклона с центром над Белым морем. Двигаясь с западными воздушными потоками, на утро 14 января 2022 г. он достиг районов Санкт-Петербурга. Далее, углубляясь, циклон смешался в московском направлении.

При этом погодные условия Беларусь определялись влиянием активных атмосферных фронтов от циклона FAMKE, которые привели к формированию неустойчивой ветреной погоды в республике. В утренние часы территория Беларусь находилась под влиянием фронта окклюзий, а в первую половину дня отмечалось прохождение основного холодного фронта и вторичных холодных фронтов при плотном барическом градиенте.

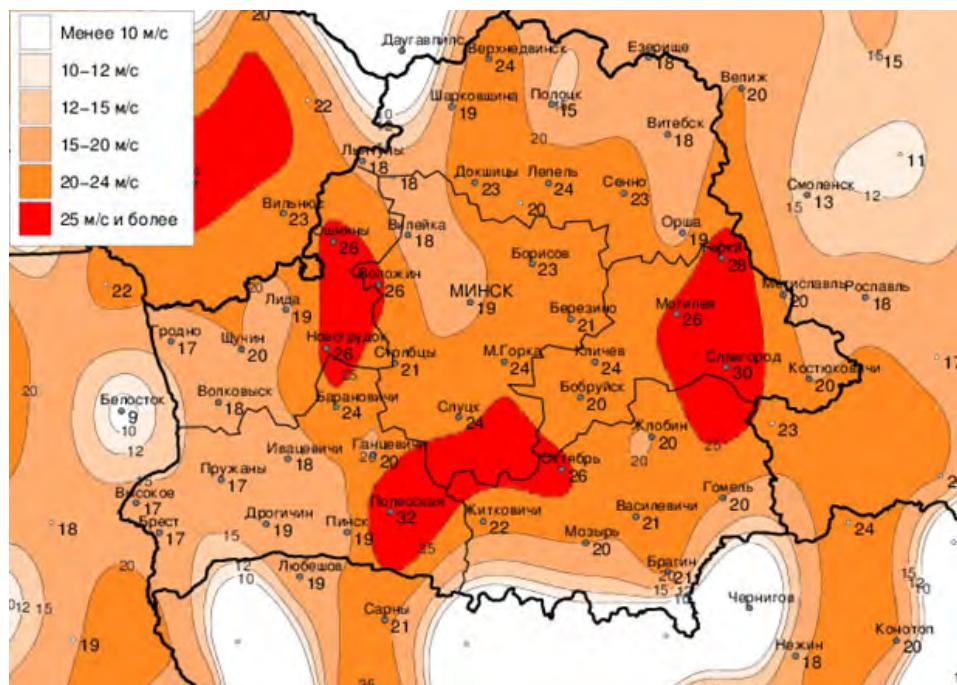
В результате днем на большей части территории страны прошли осадки (дождь, переходящий в мокрый снег, снег), местами по республике отмечалось налипание мокрого снега, в отдельных районах прогремели грозы. Во многих районах страны произошло усиление ветра порывами 15–24 м/с, которые местами достигали 26–32 м/с (рис. 4).

В ночные часы 15 января 2022 г. республика оказалась в холодной тыловой части циклона, поэтому в осадках начал преобладать снег, сохранялся порывистый ветер и метели. Днем, по мере смещения циклона вглубь России, снегопады, порывы ветра и метели в Беларусь ослабели.

Высотные аэрологические условия формирования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра порывами 25 м/с и более, как правило, были связаны с развитием кучево-дождевой облачности, которая имела нижнюю и верхнюю границу около 500 и 3000 м соответственно.

Температуры воздуха на уровне изобарической поверхности AT-850 колебались от +1,4 до –11,3 °C, дефициты точки росы – от 0 до 10 °C. При этом гребень теплого воздуха быстро сменялся ложбиной холода. В сложившейся тенденции исключением являлся случай 17–18 ноября 2000 г. в Славгороде, где фиксировалась температура +6,2 °C.

По высотам преобладали ветры северо-западного направления. При этом на уровне AT-700 наблюдалась ветры со скоростями 50–170 км/ч, на уровне AT-500 – 50–230, на уровне AT-300 – 50–300 км/ч. Данный факт свидетельствует о наличии струйных течений на уровнях AT-700, AT-500 и AT-300, способствующих быстрому смещению барических образований и усиливающих конвективные процессы.



**Рис. 4. Распределение максимальной скорости ветра (м/с) по территории Беларуси с 9 часов 14 января до 9 часов 15 января 2022 г.**

**Fig. 4. Distribution of the maximum wind speed (m/s) on the territory of Belarus from 9 a. m. on January 14 to 9 a. m. on January 15, 2022**

На рис. 5 представлена аэрологическая диаграмма за 14 января 2022 г. по метеостанции Полесская, где в период с 12 ч 18 мин до 12 ч 30 мин усиливался ветер порывами до 32 м/с. Так, согласно аэрологическим данным, на уровне изобарической поверхности АТ-850 наблюдался гребень теплого и относительно сухого воздуха, поэтому усиление ветра в результате прохождения холодного фронта осадками не сопровождалось. При этом в приземном слое наблюдался порывистый северо-западный ветер со скоростями до 130 км/ч, а в средней и верхней тропосфере преобладали сильные ветры северо-западного направления со скоростями до 260 км/ч.

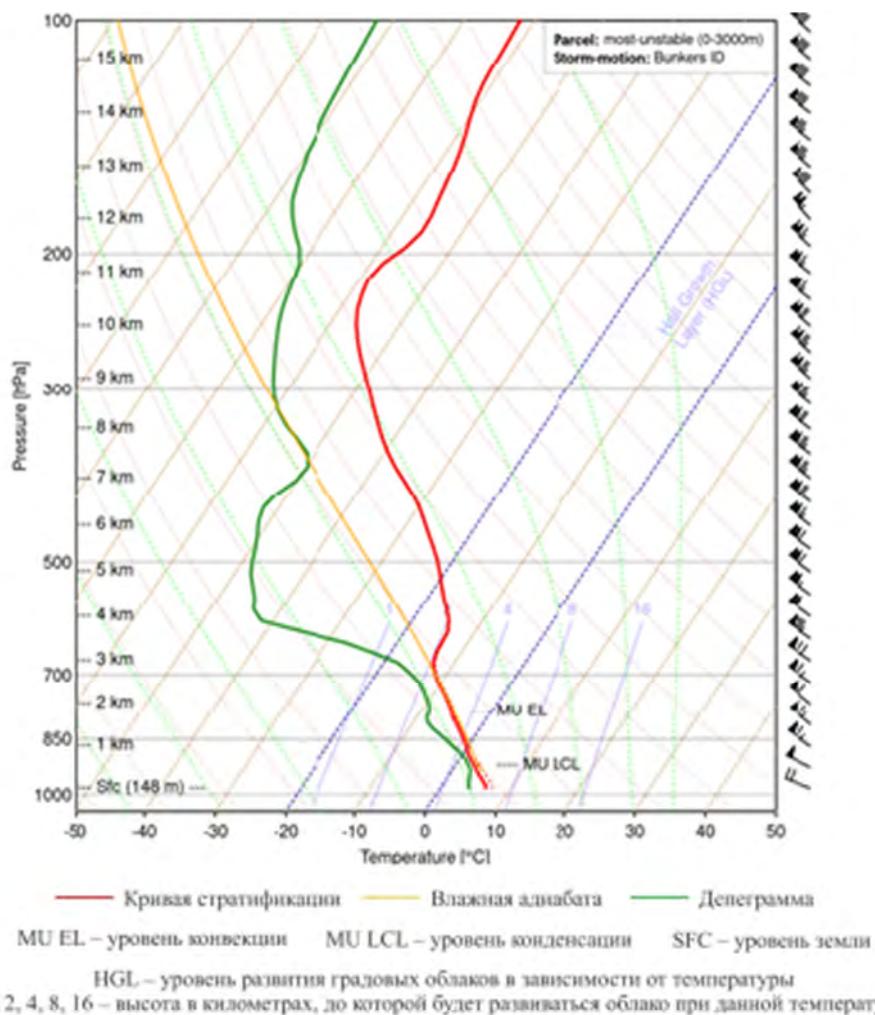
Индексы неустойчивости атмосферы, как правило, имели следующие значения: CAPE – 0...81 Дж/кг (небольшая неустойчивость), CIN – 0...–30 Дж/кг (конвекция), Li – 0...24 (устойчивое состояние атмосферы). Эти значения говорят о том, что при прогнозе очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года следует использовать значения индекса неустойчивости CIN, который указывает на вероятность развития конвективных процессов в атмосфере [27].

**Заключение.** В холодный период с 1989 по 2022 г. на территории Республики Беларусь было зафиксировано 66 случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра порывами 25–32 м/с.

В пространственном разрезе наибольшее число случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра пришлось на северо-западные, восточные и центральные регионы страны, что обусловлено не только синоптическими условиями (северо-запад Республики первый подвергается влиянию активных западных и ныряющих циклонов), но и местными физико-географическими условиями метеорологических станций (возвышенный рельеф, открытая незалесенная местность и др.).

Для случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра характерен сложный временной ход. Так, наибольшее количество зафиксированных фактов ОЯ пришлось на период с ноября по март 1989–2000 гг., а с 2001 по 2010 г. наблюдалась тенденция уменьшения количества ОЯ, которая сменилась новым ростом в последнем десятилетии (2011–2022 гг.). Вместе с тем линия тренда указывает на возможное дальнейшее увеличение количества рассматриваемого ОЯ.

В разрезе областей заметное увеличение числа случаев возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра за последнее десятилетие было зафиксировано на территории Гродненской области, в то время как для Витебской области, наоборот, отмечалась тенденция уменьшения количества исследуемого ОЯ. Для остальных областей Республики Беларусь было характерно равномерное распределение числа случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в течение рассматриваемого промежутка времени. В разрезе холодного периода года 57 % случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было отмечено в январе.



**Рис. 5. Аэробологические условия возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра на метеостанции Полесская (14 января 2022 г. 9 UTC)**

**Fig. 5. Aerological conditions for the occurrence of very strong (including squally) winds at the Polesskaya weather station (January 14, 2022, 9 UTC)**

Анализ приземных метеорологических и синоптических условий показал, что возникновение очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март носит преимущественно фронтальный характер. Приземные синоптические факторы формирования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра определялись не только плотным барическим градиентом, но и развитием кучево-дождевой облачности, усилением динамического фактора при прохождении фронтальных разделов: основного холодного фронта (37 случаев), холодного фронта с волнами (5), вторичных холодных фронтов (17) и фронтов окклюзий (7 случаев).

Усиление ветра до критериев очень сильного порывистого наблюдалось при выходе активных глубоких циклонов западных траекторий (59 случаев) и ныряющих (7 случаев).

Анализ высотных аэробологических условий показал, что возникновение очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было связано с развитием кучево-дождевой облачности, которая имела уровень конденсации и конвекции на высотах около 500 и 3000 м соответственно. Температуры воздуха на уровне изобарической поверхности AT-850 преимущественно колебались от +1,4°C до -11,3°C, дефициты точки росы составляли 0–10 °C. При этом гребень теплого воздуха быстро сменялся ложбиной холода. По высотам преобладали сильные ветры северо-западного направления, достигающие критериев струйного течения. Среди исследуемых индексов неустойчивости при прогнозе конвективных явлений погоды в холодный период года наилучшие показатели имеет индекс CIN, который указывает на вероятность развития конвективных процессов в атмосфере, сопровождающихся усилением ветра до критериев очень сильного порывистого.

Вышеперечисленные закономерности возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра территории Республики Беларусь с ноября по март 1989–2022 гг. позволили сформировать следующие синоптические ситуации, благоприятные к прогнозу ОЯ в холодный период года:

- прохождение основных и вторичных холодных фронтов, холодных фронтов с волнами, фронтов окклюзий, связанных с выходом глубоких западных и ныряющих циклонов в стадии максимального развития;
- наличие теплой и относительно влажной массы у земли и на уровне AT-850; наличие струйных течений северо-западного направления на уровнях AT-700, AT-500 и AT-300;
- существование слоя конвективной неустойчивости в атмосфере (значения индекса неустойчивости CIN 0...–30 Дж/кг).

Выявленные закономерности могут быть использованы в качестве синоптических рекомендаций. На начальном этапе с помощью анализа карт приземного анализа, карт барической топографии, аэрометрических диаграмм они помогут определить наличие приземных метеорологических и высотных аэрологических условий, способствующих формированию очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, что в сочетании с результатами расчетов численных моделей и оперативными радиолокационными данными в дальнейшем позволит составить прогноз опасных гидрометеорологических явлений для определенной территории или пункта.

Полученные результаты особенностей пространственно-временного распределения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра холодного периода года на территории Беларуси могут быть использованы при разработке природоохранных мероприятий с целью снижения негативных последствий от ОЯ в Беларуси и уменьшению рисков влияния этого явления на экономику и население страны. Установленные аэросиноптические условия образования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра могут рассматриваться в качестве синоптических рекомендаций для пополнения методической базы по вопросам прогнозирования ОЯ.

#### **Список использованных источников**

1. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения : ТКП 17.10-06-2008 (02120). – Минск : Минприроды, 2008. – 30 с.
2. Лукша, М. В. Аэросиноптические условия образования зимних гроз на примере аэродрома Минск-2 / М. В. Лукша, А. А. Новик // Журнал БГУ. География. Геология. – 2022. – № 1. – С. 42–56.
3. Лукша, М. В. Научное обоснование прогноза конвективных явлений холодного периода на примере аэродрома Минск-2 : дис. маг. / М. В. Лукша. – Минск, 2022. – 60 с.
4. Лукша, М. В. Прогноз конвективных явлений холодного периода на территории Беларуси / М. В. Лукша / XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : материалы докладов Всерос. конф., Томск, 17–20 окт. 2023 г. ; Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН ; редкол.: Е. А. Головацкая. – Томск : Ин-т мон-га клим. и эколог. с-м СО РАН, 2023. – С. 68–71.
5. Luksha, M. V. Features of synoptic processes of winter thunderstorms on the territory of the Minsk Region in a changing climate / M. V. Luksha, A. A. Novik // Śląskie prace geograficzne. – 2022. – № 18. – P. 75–87.
6. Логинов, В. Ф. Географические особенности распределения гроз и шквалов на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока // Природопользование. – Минск, 2009. – Вып. 16. – С. 42–49.
7. Логинов, В. Ф. Опасные метеорологические явления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока. – Минск : Беларусская наука, 2010. – 128 с.
8. Логинов, В. Ф. Сравнение пространственно-временных особенностей изменений опасных метеорологических явлений в характерное и не характерное для них время года / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока // Природопользование. – Минск, 2011. – Вып. 19. – С. 5–22.
9. Шпока, И. Н. Пространственно-временное распределение опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.30 / И. Н. Шпока. – Минск, 2012. – 23 с.
10. Логинов, В. Ф. Климат Беларуси / В. Ф. Логинов. – Минск : Ин-т геол. наук АН Беларуси, 1996. – 235 с.
11. Данилович, И. С. Трансформация ветрового режима на территории Беларуси в условиях изменяющегося климата / И. С Данилович, И. В. Костюченко // География. – 2023. – № 2. – С. 8–16.
12. Логинов, В. Ф. Изменение климата, экстремальных погодных и климатических явлений и их связь с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка, В. С. Микуцкий // Природопользование. – Минск, 2013. – Вып. 24. – С. 5–11.
13. Сумак, Е. Н. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси / Е. Н. Сумак, И. Г. Семёнова // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2019. – № 2. – С. 79–93.
14. Юсупов, Ю. И. Прогноз шквалов и интенсивности осадков с применением термодинамических параметров и потенциального вихря Эртелья : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29 / Ю. И. Юсупов. – М., 2021. – 129 с.
15. Неижмак, А. Н. Методика прогноза конвективных опасных метеорологических явлений по комплексу спутниковых и аэрологических данных / А. Н. Неижмак, И. П. Растиргуев // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 6. – С. 100–104.
16. Алексеева, А. А. Прогноз сильных шквалов на европейской территории России и их идентификация дополнительными радиолокаторами / А. А. Алексеева, Е. В. Васильев, В. М. Бухаров. – М. : Гидромет. науч.-исслед. центр, 2017. – 18 с.
17. Дементьева, С. О. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества / С. О. Дементьева, Н. В. Ильина, М. В. Шаталина // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 150–157.

18. Вельтищев, Н. Ф. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF / Н. Ф. Вельтищев, В. Д. Жупанов, Ю. Б. Павлюков // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 1. – С. 5–18.
19. Вельтищев, Н. Ф. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции / Н. Ф. Вельтищев, В. Д. Жупанов // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 9. – С. 30–44.
20. Руководство по использованию автоматизированных расчетных методов явлений погоды на аэродромах Республики Беларусь. – Минск : Белгидромет, 2021. – 82 с.
21. Архив карт Белгидромета за 1989–2022 гг. – Ф. 1. Оп. 1. Д. : Подлинник.
22. Мельник, В. И. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия / В. И. Мельник, Е. В. Комаровская // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 23–25 апр. 2014 г. : в 4 ч. – Брест : БГТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 153–162.
23. Подгорная, Е. В. Особенности изменения климата Республики Беларусь за последние десятилетия / Е. В. Подгорная, В. И. Мельник, Е. В. Комаровская. – Минск : Белгидромет, 2015. – 120 с.
24. Государственное учреждение «Белгидромет» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-2020-goda-3666-2021>. – Дата доступа: 01.10.2022.
25. ThunderR – ERA5 sigma levels browser [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.rawinsonde.com/ERA5\\_Europe](http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe). – Date of access: 29.05.2024.
26. Хандожко, Л. А. Региональные синоптические процессы / Л. А. Хандожко. – Л. : ЛГМИ, 1988. – 103 с.
27. Индексы неустойчивости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.flymeteo.org/stat/indexneust.php>. – Дата доступа: 10.05.2024.

### References

1. *Ohrana okrughayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrometeorologiya. Pravila sostavleniya kratkosrochnyh prognozov pogody obshchego naznacheniya. TCP 17.10-06-2008 (02120)* [Environmental protection and environmental management. Hydrometeorology. Rules for making short-term general-purpose weather forecasts. TCP 17.10-06-2008 (02120)]. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2008, 30 p. (in Russian)
2. Luksha M. V., Novik A. A. *Aerosinopticheskie usloviya obrazovaniya zimnih groz na primere aerodroma Minsk-2* [Aerosynoptic conditions for the formation of winter thunderstorms on the example of the Minsk-2 airfield]. J. of BSU. Geography. Geology, 2022, no. 1, pp. 42–56. (in Russian)
3. Luksha M. V. *Nauchnoe obosnovanie prognoza konvektivnyh yavlenij holodnogo perioda na primere aerodroma Minsk-2. Diss. mag.* [Scientific substantiation of the forecast of convective phenomena of the cold season on the example of the airfield Minsk-2. Master's thesis]. Minsk, 2022, 60 p. (in Russian)
4. Luksha M. V. *Prognoz konvektivnyh yavlenij holodnogo perioda na territorii Belarusi* [Forecast of convective phenomena of the cold season in the territory of Belarus]. Materialy dokladov vserossiyskoi konferencii "XV Sibirskoe soveshchanie i shkola molodyh uchenyh po klimato-ekologicheskому monitoring" [Proc. of the All-Russian Conf. "XV Siberian Meeting and School of Young Scientists on climate and Environmental Monitoring"]. Tomsk, 2023, pp. 68–71. (in Russian)
5. Luksha M. V., Novik A. A. Features of synoptic processes of winter thunderstorms on the territory of the Minsk Region in a changing climate. *Słupskie Prace Geograficzne*, 2022, no. 18, pp. 75–87.
6. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Geograficheskie osobennosti raspredeleniya groz i shkvalov na territorii Belarusi* [Geographical features of the distribution of thunderstorms and squalls on the territory of Belarus]. Nature Management, 2009, iss. 16, pp. 42–49. (in Russian)
7. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya na territorii Belarusi* [Hazardous meteorological phenomena on the territory of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2010, 128 p. (in Russian)
8. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Sravnenie prostranstvenno-vremenennyh osobennostej izmenenij opasnyh meteorologicheskikh yavlenij v harakternoe i ne harakternoe dlya nih vremya goda* [Comparison of spatiotemporal features of changes in hazardous meteorological phenomena in characteristic and non-characteristic seasons]. Nature Management, Minsk, 2011, iss. 9, pp. 5–22. (in Russian)
9. Shpoka I. N. *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie opasnyh meteorologicheskikh yavlenij na territorii Belarusi*. [Spatial and temporal distribution of hazardous meteorological phenomena in the territory of Belarus]. Avtoref. diss. kand. geogr. nauk [PhD of geogr. sci. diss. abstr.]. Minsk, 2012, 23 p. (in Russian)
10. Loginov V. F. *Klimat Belarusi* [The climate of Belarus]. Minsk, Inst. of Geo. Sci. of the Acad. of Sci. of Belarus, 1996, 235 p. (in Russian)
11. Danilovich I. S., Kostyuchenko I. V. *Transformaciya vetrovogo rezhima na territorii Belarusi v usloviyah izmenyayushchegosya klimata* [Transformation of the wind regime on the territory of Belarus in a changing climate]. Geography, 2023, no. 2, pp. 8–16. (in Russian)
12. Loginov V. F., Brovka Yu. A., Mikutsky V. S. *Izmenenie klimata, ekstremal'nyh pogodnyh i klimaticeskikh yavlenij i ih svyaz' s tipami cirkulyacii atmosfery Severnogo polushariya po B. L. Dzerdzeevskomu* [Climate change, extreme weather and climatic phenomena and their relationship with the types of atmospheric circulation in the Northern hemisphere according to B. L. Dzerdzevsky]. Nature Management, Minsk, 2013, iss. 24, pp. 5–11. (in Russian)
13. Sumak E. N., Semenova I. G. *Ciklonicheskaya aktivnost' i povtoryaemos' opasnyh yavlenij pogody nad territoriej Belarusi* [Cyclonic activity and recurrence of hazardous weather phenomena over the territory of Belarus]. J. of the Belarusian State University. Geography. Geology, 2019, no. 2, pp. 79–93. (in Russian)
14. Yusupov Yu. I. *Prognoz shkvalov i intensivnosti osadkov s primeneniem termodinamicheskikh parametrov i potencial'nogo vihrya Ertelya* [Forecast of squalls and precipitation intensity using thermodynamic parameters and a potential Ertel vortex]. Dis. kand. fiz.-mat. nauk [PhD phys. and math. sci. dis.]. Moscow, 2021, 129 p. (in Russian)

15. Neizhmak A. N., Rastorguev I. P. *Metodika prognoza konvektivnyh opasnyh meteorologicheskikh yavlenij po kompleksu sputnikovyh i aerologicheskikh dannyh* [Methodology for forecasting convective hazardous meteorological phenomena based on a complex of satellite and aerological data]. *Successes of Modern Natural Science*, 2019, no. 6, pp. 100–104. (in Russian)
16. Alekseeva A. A., Vasiliev E. V., Bukharov V. M. *Prognoz sil'nyh shkvalov na evropejskoj territorii Rossii i ih identifikaciya doplerovskimi radiolokatorami* [Forecast of strong squalls on the European territory of Russia and their identification by Doppler radars]. Moscow, Hydromet. scientific research. center, 2017, 18 p. (in Russian)
17. Dement'eva S. O., Ilyina N. V., Shatalina M. V. *Prognoz konvektivnyh yavlenij i ego verifikasiya po dannym nablyudenij atmosfernogo elektrichestva* [Forecast of convective phenomena and its verification based on observations of atmospheric electricity]. *Izvestiya Ras. Physics of the Atmosphere and Ocean*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 150–157. (in Russian)
18. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D., Pavlyukov Yu. B. *Kratkosrochnyj prognoz sil'nyh osadkov i vетра s pomoshch'yu razreshayushchih konvekciyu modelej WRF* [Short-term forecast of heavy precipitation and wind using convection-permitting WRF models]. *Meteorology and Hydrology*, 2011, no. 1, pp. 5–18. (in Russian)
19. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D. *Eksperimenty po chislennomu modelirovaniyu intensivnoj konvekcii* [Experiments on numerical modeling of intense convection]. *Meteorology and Hydrology*, 2008, no. 9, pp. 30–44. (in Russian)
20. *Rukovodstvo po ispol'zovaniyu avtomatizirovannyh raschetnyh metodov yavlenij pogody na aerodromah Respubliki Belarus* [Guidelines for the use of automated calculation methods of weather phenomena at airfields of the Republic of Belarus]. Minsk, Belgidromet Publ., 2021, 82 p. (in Russian)
21. *Arhiv kart Belgidrometa za 1989–2022 gody* [Archive of Belgidromet maps for 1989–2022]. Fund 1. Inventory 1. Case : Original (in Russian)
22. Mel'nik V. I., Komarovskaya E. V. *Osobennosti izmeneniya klimata na territorii Respubliki Belarus' za poslednie desyatilietya* [Features of climate change in the territory of the Republic of Belarus over the past decades]. *Sbornik nauchnyh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii "Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya"* [Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. 'Actual sci., tech. and environmental problems of habitat conservation']. Brest, 2014, part 1, pp. 153–162. (in Russian)
23. Podgornaya E. V., Melnik V. I., Komarovskaya E. V. *Osobennosti izmeneniya klimata Respubliki Belarus' za poslednie desyatilietya* [Features of climate change in the Republic of Belarus in recent decades]. Minsk, Belgidromet Publ., 2015, 120 p. (in Russian)
24. *Gosudarstvennoe uchrezhdenie "Belgidromet"* [The State institution "Belgidromet"]. Available at: <http://www.belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-2020-goda-3666-2021> (accessed 1 November 2022). (in Russian)
25. ThundeR – ERA5 sigma levels browser. Available at: [http://www.rawinsonde.com/ERA5\\_Europe](http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe) (accessed 29 May 2024).
26. Handozhko L. A. *Regional'nye sinopticheskie processy* [Regional synoptic processes]. Leningrad, 1988, 103 p. (in Russian)
27. *Indeksy neustojchivosti* [Instability indices]. Available at: <http://www.flymeteo.org/stat/indexneust.php> (accessed 10 May 2024). (in Russian)

#### Информация об авторах

**Лукша Марина Вячеславовна** – аспирант Белорусского государственного университета, начальник отдела краткосрочных прогнозов погоды, неблагоприятных и опасных явлений службы метеорологических прогнозов, Белгидромет (пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: maril2010@mail.ru

**Новик Алексей Александрович** – кандидат географических наук, доцент, докторант, кафедра общего землеведения и гидрометеорологии, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: aliaksei\_novik@yahoo.com

#### Information about authors

**Marina V. Luksha** – Post-Graduate student of the Belarusian State University, Head of the Department of Short-term Weather Forecasts, Adverse and Hazardous Phenomena of the Meteorological Forecasting Service, Belhydromet (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: maril2010@mail.ru

**Aliaksei A. Novik** – Ph. D. (Geography), Assistant Professor, Doctoral Candidate, Department of General Earth Science and Hydrometeorology, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: aliaksei\_novik@yahoo.com

## ЛОКАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ЧАСТИЦ МАКРО- И МИКРОПЛАСТИКА ПОЛИСТИРОЛА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

Т. И. Кухарчик, К. О. Рябычин

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье рассмотрены промышленные предприятия, использующие первичные полимеры стирола как потенциальные источники загрязнения окружающей среды частицами макро- и микропластика на территории Беларуси. В качестве фактических материалов использованы данные интерактивной информационно-аналитической системы Национального статистического комитета, а также результаты запросов в Национальный статистический комитет, Государственный таможенный комитет, Бел НИЦ «Экология» и на промышленные предприятия. Представлены объемы применения в стране полистирола вспенивающегося, предназначенного для производства теплоизоляционных плит, упаковки и другой продукции, за 20-летний период. Показано, что по сравнению с 2000 г. объемы использования полистирола вспенивающегося в 2020 г. выросли в 2,2 раза и составили 13,3 тыс. т. Установлено, что примерно 44 % общего количества сырья полистирола используется предприятиями г. Минска и Минской области. Наибольшее количество предприятий, использующих полистирол, расположены в бассейнах рек Днепра (29) и Немана (15).

Общие объемы образования отходов полистирола в 2020 г. составили 7,2 тыс. т, из которых около 8 % (или 0,55 тыс. т) представлено отходами пенопласта. Показано, что более высокие уровни накопления отходов вспененных материалов из полистирола характерны для административных районов с областными городами. Вместе с тем более чем для половины административных районов Беларуси (64) официальные данные по отходам полистирола отсутствуют.

Обсуждены источники поступления полистирола и связанного с ним гексабромциклогодекана в компоненты природной среды, а также необходимость разработки природоохранных мер по предотвращению рассеяния отходов и выноса сырьевых частиц за пределы промплощадок.

**Ключевые слова:** полистирол вспенивающийся; пенополистирольные плиты; отходы полистирола; источники загрязнения; гексабромциклогодекан.

**Для цитирования.** Кухарчик Т. И., Рябычин К. О. Локальные источники поступления частиц макро- и микропластика полистирола в окружающую среду на территории Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 33–45.

## LOCAL SOURCES OF MACRO- AND MICROPLASTIC OF POLYSTYRENE RELEASES INTO THE ENVIRONMENT ON THE TERRITORY OF BELARUS

Т. И. Кухарчик, К. О. Рябычин

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

**Abstract.** In the article industrial enterprises using primary polymers of styrene as potential sources of environmental pollution by macro- and microplastic in Belarus are discussed. The data used include data from the interactive information-analytical system of the National Statistical Committee, as well as results of inquiries to the National Statistical Committee, the State Customs Committee, the Bel NIC "Ecologiya", and industrial enterprises. Over a 20-year period, the volumes of expandable polystyrene used in the country for the production of insulation boards, packaging, and other products are presented. It is shown that compared to 2000 the use of expandable polystyrene in 2020 increased by 2.2 times, reaching 13.3 thousand tons. Approximately 44 % of the total polystyrene raw material is used by enterprises in Minsk and Minsk region. The largest number of enterprises using polystyrene is located in the basins of the Dnieper River (29) and the Neman River (15).

The total volume of polystyrene waste generated in 2020 amounted to 7.2 thousand tons, of which about 8 % (or 0.55 thousand tons) was polystyrene foam waste. Higher levels of accumulation of expanded polystyrene waste are typical for administrative districts with regional centers. At the same time, official statistics do not account for polystyrene waste in 64 administrative districts.

The sources of polystyrene and associated hexabromocyclododecane entering the natural environment, as well as the need to develop environmental protection measures to prevent the dispersion of waste and the release of raw material particles beyond industrial sites are discussed.

**Keywords:** foaming polystyrene; expanded polystyrene boards; polystyrene waste; pollution sources; hexabromocyclododecane.

**For citation.** Kukharchyk T. I., Rabychyn K. O. Local sources of macro- and microplastic of polystyrene releases into the environment on the territory of Belarus. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 33–45.

**Введение.** Загрязнение окружающей среды пластиком и микропластиком – одна из широко обсуждаемых экологических проблем современности [1–3]. Воздействие пластика на компоненты природной среды и живые организмы возможно на всех этапах его жизненного цикла: от процессов производства до управления отходами [4]. Пластик, содержащий во многих случаях опасные химические вещества, является чужеродным материалом для природной среды. Его разрушение, физическое и химическое выветривание, выщелачивание сопровождаются необратимыми процессами загрязнения и всё возрастающими негативными последствиями глобального масштаба [5].

Полистирол, как и другие типы полимеров, обнаруживается в различных компонентах природной среды. Его производство было начато в середине 1960-х годов и к 2019 г. достигло 21 млн т, что составляет 5 % общего количества всех полимеров [2]. Отмечается растущий спрос на упаковку и строительные материалы из полистирола [6, 7]. К 2060 г. мировые объемы его производства прогнозируются на уровне 55 млн т [2]. Это означает, что будут увеличиваться объемы образования отходов, вторичная переработка которых, как и других видов полимерных отходов, пока крайне недостаточна.

Распространению отходов полистирола в окружающей среде способствует не только широкая сфера применения данного полимера, но и свойство производимой продукции (особенно пенопласта и вспененных гранул) легко переноситься с водными и воздушными потоками. Следует подчеркнуть, что полистирольные изделия, оказавшиеся в окружающей среде, быстро разрушаются при механическом воздействии с образованием большого количества мелких частиц, в том числе микропластика. Процессы разрушения пенопласта в прибрежной зоне моря продемонстрированы в работе [8]. В ходе экспериментальных исследований установлено, что полное разрушение образцов пенополистирола до микрочастиц (<5 мм) происходит за 3–6 дней [9].

Полистирол не биоразлагаем и может сохраняться в окружающей среде сотни лет, оказывая негативные воздействия на почвы, водные системы и живые организмы. По данным работы [10], пенополистирол, помещенный в грунт и извлеченный через 31 год, не утратил теплофизических характеристик.

Опасность рассеяния полистирола связана не только с его механическим/физическими воздействием на компоненты природной среды, но и с возможностью химического воздействия в связи с содержанием в нем гексабромциклогидодекана (ГБЦД), который относится к стойким органическим загрязнителям (СОЗ). ГБЦД использовался и продолжает использоваться как добавка, снижающая способность к горению материала [11]. Несмотря на ограничения, принятые в связи с включением его в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ, ГБЦД продолжает использоваться при производстве пенополистирольных плит. Соответственно, содержащие его материалы пока остаются в обращении и их запасы будут увеличиваться. На опасность распространения ГБЦД с отходами пенопласта указано в работе [12] при изучении прибрежного Азиатско-Тихоокеанского региона.

Зафиксированный впервые более 40 лет назад в прибрежной зоне Новой Англии [13, 14] полистирол в настоящее время обнаруживается в различных компонентах природной среды. Так, пенопласт является одним из наиболее часто встречающихся видов пляжного мусора вдоль южного побережья штата Калифорния [15, 16]. Практически повсеместно его фрагменты зафиксированы на пляжах юго-восточной части Балтийского моря [9, 17]. Недавно вспененные гранулы полистирола были обнаружены в Антарктиде в кишечнике организмов класса *Collembola* [18].

В Беларуси высокие уровни загрязнения почв полистиролом зафиксированы в зонах воздействия промышленных предприятий, использующих первичные полимеры стирола в производственном процессе. Согласно работам [19, 20], фрагменты пенополистирольных плит, вспененные гранулы и частицы сырьевых материалов являются типичными загрязнителями почв, что свидетельствует о важности изучения данной категории источников полистирола.

Цель работы – проанализировать объемы и сферы применения полистирола в Беларуси, размещение промышленных предприятий, а также образование отходов полистирола для оценки возможных потоков и путей его поступления в окружающую среду.

**Материалы и методы исследований.** В качестве фактического материала использованы данные интерактивной информационно-аналитической системы Национального статистического комитета, а также результаты запросов в Национальный статистический комитет, Государственный таможенный

комитет, БелНИЦ «Экология», на промышленные предприятия. Собраны данные об импорте/экспорте первичных полимеров стирола (коды ТН ВЭД ЕАЭС 3903110000 «Полистирол вспенивающийся» и 39031100 «Прочий полистирол»), производстве продукции из полистирола (коды ОКРБ 22.21.41.200 – Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола пористые и 22.21.30.300 – Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола неармированные или не комбинированные с другими материалами), а также данные об образовании отходов полистирола (коды 5710800, 5710801, 5710803, 5710804). Выборочная рассылка запросов на промышленные предприятия позволила получить данные о типах используемого сырья и содержащихся в нем антиприенов. Кроме того, использованы открытые источники информации, касающиеся производителей продукции из полистирола на территории Беларуси, нормативно-техническая документация, справочная и научная литература, фондовые данные лаборатории трансграничного загрязнения. Для предварительной оценки путей распространения полистирола в окружающей среде проведены рекогносцировочные эколого-геохимические исследования в зонах воздействия ряда предприятий, расположенных в г. Минске, Борисовском и Дзержинском районах.

**Результаты и их обсуждение. Общие сведения о полистироле.** К первичным полимерам стирола относятся полистирол общего назначения, ударопрочный полистирол (HIPS) и вспенивающийся полистирол (EPS). Для производства вспененных видов продукции (теплоизоляционных плит или пенопласта, одноразовой посуды, упаковки и других видов) используются вспенивающийся полистирол и некоторые виды полистирола общего назначения (табл. 1). Другими сферами применения полистирола общего назначения являются упаковка и контейнеры для пищевых продуктов, одноразовая посуда, различные пленки, другие товары народного потребления. Ударопрочный полистирол используется для производства корпусов электротехники, автотракторного оборудования и т. д. В структуре мирового производства на ударопрочный полистирол приходится около 55 % [21].

**Таблица 1. Сфера использования полимеров стирола [21]**

**Table 1. Areas of use of styrene polymers [21]**

Сфера использования	Полимер стирола		
	Общего назначения	Вспенивающийся	Ударопрочный
Упаковка	Пищевые контейнеры, упаковка непродовольственных товаров (крышки компакт-дисков, бутылки и пр.), двухосноориентированная пленка, многослойные пленки	Пенопласт для упаковки продуктов питания, техники и электроники	Пищевые контейнеры, упаковка непродовольственных товаров (крышки компакт-дисков, бутылки и пр.), двухосноориентированная пленка, многослойные пленки
Строительство	Экструдированный ПС для шумо-, тепло- и гидроизоляционных листов, облицовочные и декоративные материалы (потолочная плитка, плитки и пр.)	Вспененные утеплительные плиты, сэндвич-панели, опалубка, фасадные системы и др.	–
Электротехника, кабельная промышленность, бытовая техника	Корпусные элементы бытовых приборов	Утепление корпусов холодильников	Корпусные элементы бытовых приборов
Машиностроение	Детали интерьера и внешней отделки автомобилей	Утеплитель кузова автомобилей (кунги, хлебовозные машины, машины с рефрижераторами)	–
Товары народного потребления и прочее	Одноразовая посуда, игрушки, канцтовары, одноразовые медицинские инструменты и др.	Елочные игрушки	Контейнеры для продуктов (специальные марки)

Крупнейшим производителем и потребителем полистирола являются страны Азии: Китай обеспечивает около 24 % мирового производства полистирола, другие азиатские страны – 36 %. Мощности стран Северной Америки и Европы позволяют выпускать по 16 % полистирола в год [21].

Первичные полимеры стирола производятся в виде цилиндрических или сферических гранул размером от 0,4 до 5,0 мм (ОСТ 301-05-202-92Е, ГОСТ 20282-86); некоторые виды полистирола общего назначения выпускаются в виде порошка. Иными словами, сырье полистирола по размерам частиц относится к микропластику.

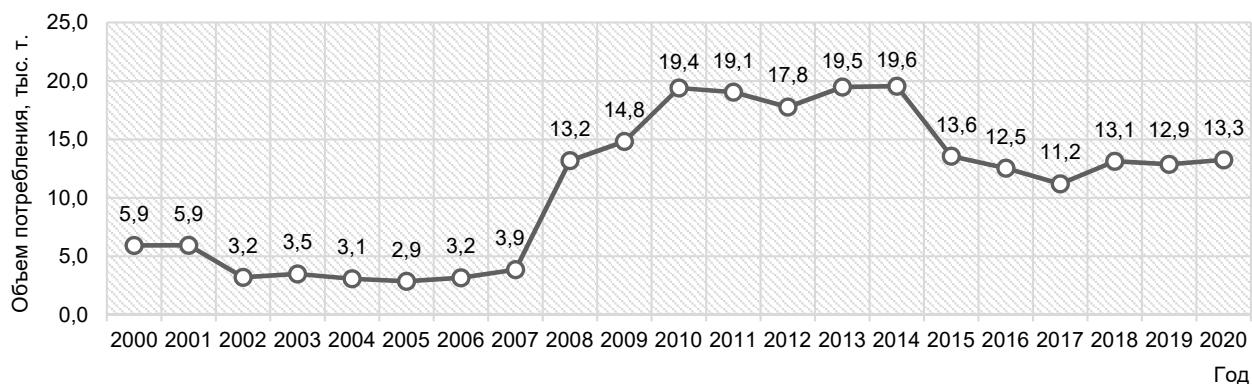
Особого внимания заслуживает вспенивающийся полистирол и производимая из него продукция. Первоначально пенополистирол был изготовлен во Франции в 1928 г. Его промышленное производство было начато в Германии в 1937 г., в СССР – в 1939 г. С 1950 г. вспенивающийся полистирол являлся основным изоляционным полимерным материалом, получившим широкое применение в строительстве. В Беларуси первый цех по производству теплоизоляционных плит был введен в эксплуатацию в 1964 г. на Минском комбинате силикатных изделий.

Вспенивающийся полистирол содержит 5–6 % смеси изопентана и пентана, а также антипирены. На протяжении нескольких десятилетий в качестве антипирена применялся ГБЦД, который в 2013 г. был включен в Приложение А (ликвидация) Стокгольмской конвенции о СОЗ. По данным работы [22], концентрация ГБЦД в полистироле вспенивающемуся и пенополистирольных изделиях составляет 0,5–1,0 % при среднем значении 0,7 %, в экструдированном – 0,5–3,0 % при среднем значении 2,0 %. По оценкам [23], ежегодные объемы поступления ГБЦД в Беларусь в составе полистирола вспенивающегося могли составлять сотни тонн.

**Использование полимеров стирола в Беларуси.** На территории Беларуси полимеры стирола не производятся, но используются для производства различных видов продукции. Согласно данным Государственного таможенного комитета Республики Беларусь, в нашу страну поступает полистирол в первичных формах: в виде полистирола вспенивающегося и прочих видов полистирола. Объемы импорта полистирола вспенивающегося в 2020 г. составили 13,3 тыс. т, экспорта – 1 т. Ориентировочные объемы потребления в нашей республике оцениваются в 13,3 тыс. т.

На рис. 1 представлена динамика использования полистирола вспенивающегося в Беларуси за 20-летний период. В период с 2000 по 2007 г. объемы потребления полистирола находились в диапазоне 2,9–5,9 тыс. т, с 2008 г. наблюдался их быстрый рост. Максимальные значения, достигающие почти 20 тыс. т, были характерны для 2010–2014 гг. В целом, по сравнению с 2000 г. объемы использования полистирола вспенивающегося выросли в 2,2 раза, чему способствовало повышение требований к энергоэффективности зданий в Беларуси. Всего за период с 2000 по 2020 г. в страну импортировано около 198 тыс. т полистирола вспенивающегося, экспортировано – менее 2 тыс. т.

Доля полистирола вспенивающегося от общего потребления первичных полимеров стирола в течение рассматриваемого периода несколько изменялась, составив 25–29 % в период 2010–2014 гг. и 17–19 % в последующие годы. По данным работы [24], в России доля вспенивающегося полистирола в общем объеме полимеров стирола в начале 2000-х годов варьировалась в пределах 22–26 %.



**Рис. 1. Динамика использования полистирола вспенивающегося на территории Беларуси (по данным импорта – экспорта), 2000–2020 гг.**

**Fig. 1. Dynamics of the use of foaming polystyrene in the territory of Belarus (according to import – export data), 2000–2020**

Полистирол вспенивающийся поступает в Беларусь из России, Нидерландов, Китая, Германии, Франции и других стран. В 2020 г. на долю России пришлось 62 % от поступающего в страну вспенивающегося полистирола; на втором месте по объему импорта среди стран-производителей – Нидерланды (14 %).

С учетом ранее полученных данных [23], а также результатов запросов установлено, что при производстве полистирола вспенивающегося на предприятиях России (ОАО «Сибур-Химпром», ОАО «Пластик») использовался ГБЦД, содержание которого в продукте составляло от 0,6 до 1,0 %. С января 2019 г. на ОАО «Сибур-Химпром» вместо ГБЦД применяется полимерный антипирен на основе бромированной смолы стирола [25, 26].

**Использование полистирола вспенивающегося и виды продукции.** В настоящее время в Беларусь насчитывается несколько десятков предприятий, производящих продукцию из вспенивающегося полистирола. В перечне производимой продукции находятся пенополистирольные тепло-, звуко- и шумоизоляционные плиты (пенопласт разных марок), одноразовая посуда, упаковка, шарики или крошка, пенополистиролбетон и др. (рис. 2). Пенополистирольные плиты используются как самостоятельно для изоляции, так и в составе готовых строительных конструкций в виде многослойных стеновых панелей или композитных СИП-панелей. Вспененный полистирол добавляется также к бетонным растворам.

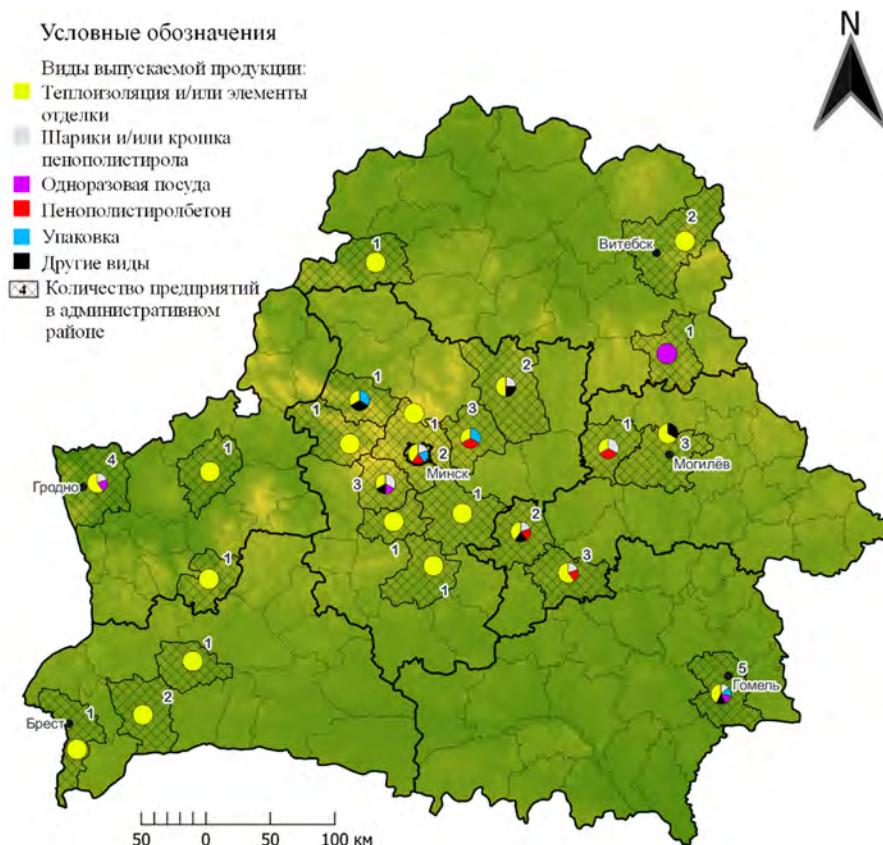


Рис. 2. Виды выпускаемой продукции из вспенивающегося полистирола

Fig. 2. Types of products made of foaming polystyrene

Наибольшее количество предприятий занимается производством теплоизоляционных плит. При этом различают плиты пенополистирольные теплоизоляционные (СТБ 1437-2004), изготавливаемые беспресовым способом из вспенивающегося полистирола, и изделия теплоизоляционные из экструдированного полистирола (СТБ 2148-2010), изготавливаемые методом экструзии. В Беларусь плиты пенополистирольные производят под различными названиями и разных марок (ППТ-15, ППТ-20, ППТ-25, ППТ-35, пенопласт, пенополистирол, «Тензиплекс», «Сарматерм»; «Белплекс» и др.). Плиты из экструдированного пенополистирола выпускают под названиями «Батэплекс», «Пеноплекс», «Истплекс», «CARBON SOLID», «CARBON ECO» и др.

На основании имеющейся информации выявлены три предприятия с объемами потребления полистирола вспенивающегося более 1000 т/год, два предприятия – от 500 до 1000, девять предприятий с объемами потребления от 100 до 500 т/год и ряд более мелких, что отображено на рис. 3. Следует отметить, что обозначенные на нем предприятия лишь частично отражают ситуацию в стране. Благодаря достаточно простой технологии производства вспененных материалов в Беларусь функционирует большое количество малых предприятий, преимущественно частной формы собственности, в отношении которых сведения практически отсутствуют (за исключением рекламной информации, размещенной на сайтах). Это затрудняет получение полной картины распределения предприятий в стране, их состояния, объемов потребления сырья и производства продукции.



**Рис. 3. Местоположение предприятий, использующих вспенивающийся полистирол, в Беларуси**

**Fig. 3. Location of enterprises using foaming polystyrene in Belarus**

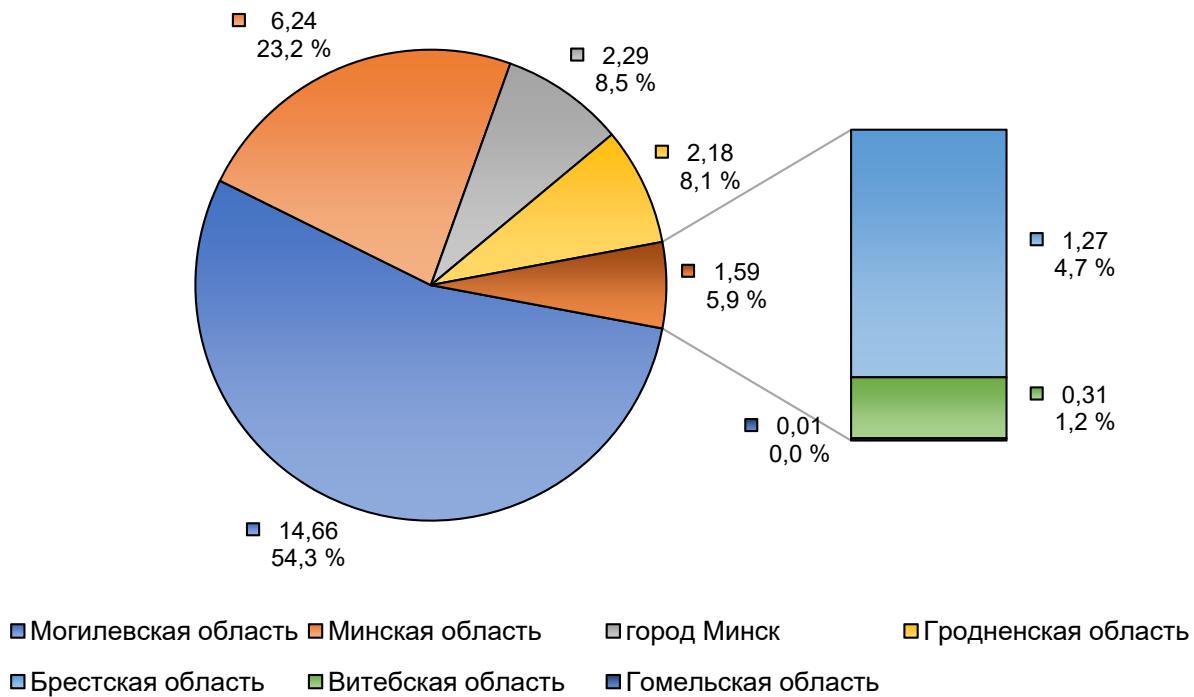
Крупнейшие предприятия по производству пенополистирольных теплоизоляционных плит по данным запросов расположены в Минске и Гродно. Среди административных единиц по количеству предприятий (15) лидирует Минская область. Анализ расположения предприятий в пределах водосборов показал, что наибольшее количество предприятий, использующих полистирол, расположено в бассейнах рек Днепра (29) и Немана (15). В пределах водосбора Западного Буга – по 4 предприятия, Припяти и Западной Двины – по 2 предприятия.

Официальной статистикой объемы производства продукции из полистирола учитываются в соответствии с кодами ОКРБ 22.21.41.200 (Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола пористые) и 22.21.30.300 (Плиты, листы, пленка, фольга и полосы из полимеров стирола неармированные или не комбинированные с другими материалами). Выпуск продукции в натуральном выражении в стране для указанных категорий в 2020 г. составил 56,5 тыс. т. Данный уровень объема (при вариабельности от 46,3 до 63,8 тыс. т) сохраняется с 2011 г.

Объемы производства вспененных продуктов в 2020 г. составили 27,0 тыс. т. Около 2,5 тыс. т было импортировано в страну и около 1 тыс. т экспортировано. Соответственно, в стране объемы использования продукции из вспененного полистирола оцениваются в 28,5 тыс. т.

Анализ распределения объемов производства продукции под кодом 22.21.41.200 по регионам показал, что на долю Могилевской области приходится 55 % общего объема производства. В Минской области и г. Минске выпускается в сумме 32 % общего количества продукции (рис. 4). Основными производителями в данном регионе являются ООО «Анастан», ОАО «Минский комбинат силикатных изделий», ЧПТУП «ТМ-СтройПласт», ООО «ВармХаусГрупп», ООО «Гринвал», ООО «Эксперт-трейд», ДУП «ССК УП «Минскоблсельстрой», ООО «Доминвестпро», ООО «Эухарис».

Это обстоятельство необходимо учитывать при рассмотрении конкретных источников поступления частиц полистирола в окружающую среду и их воздействия на экосистемы и здоровье человека. Как известно, вспененные изделия из полистирола, в том числе пенополистирольные плиты, на 98 % состоят из воздуха, а их плотность находится в диапазоне 0,028–0,035 г/см<sup>3</sup>, что способствует их быстрому перемещению в окружающей среде.



**Рис. 4. Соотношение выпуска продукции из полистирола, соответствующей коду ОКРБ 22.21.41.200, по административным единицам в Беларуси, 2020 г., тыс. т**

**Fig. 4. The ratio of the output of polystyrene products corresponding to the OKRB code 22.21.41.200 for administrative units in Belarus, 2020, thous. t**

Сравнивая показатели оборота сырья на территории страны и выпуска вспененных видов продукции, можно заметить, что производство продукции в виде листов и плит пористых превышает оборот полистирола вспенивающегося более чем в 2 раза. Так, например, в 2020 г. примерный оборот сырья составил 13,3 тыс. т, в тот же период выпуск продукции достиг 26,9 тыс. т. Данные различия объясняются тем, что под кодом ОКРБ 22.21.41.200 понимается не только продукция в виде пенополистирольных плит, но и плиты из экструдированного полистирола (XPS). Этот вид продукции производится преимущественно с использованием полистирола общего назначения.

В поддержку данного утверждения свидетельствует наличие в стране больших мощностей по производству XPS. ИООО «Кровельный завод ТехноНИКОЛЬ», расположенный в г. Осиповичи Могилёвской области, имеет мощности, позволяющие ежегодно выпускать около 360 тыс. м<sup>3</sup> плит XPS. При средней плотности плит в 30,5 кг/м<sup>3</sup> объем выпуска составляет около 11 тыс. т год, соответственно, и объемы использования сырья будут близкими по значению. Кроме «ТехноНИКОЛЬ» в стране имеется еще несколько предприятий, выпускающих плиты XPS: ООО «СтироЛБай» производит продукцию под маркой Истплекс, ОАО «БАТЭ» – под маркой Батэплекс.

Детальная информация о производстве отдельных видов продукции отсутствует, что затрудняет выделение основных секторов потребления полистирола вспенивающегося: упаковки и строительства. По данным работы [27], на глобальном уровне это соотношение примерно одинаково. В структуре российского потребления около 90 % полистирола связано со строительством [28]. В Западной Европе и США на строительство приходится до 74–75 % общего объема производства. В странах Азии доминирующим сектором является производство упаковки, на долю которого приходится около 64 % общего потребления вспенивающегося полистирола. Согласно полученным данным, в Беларуси преобладающим видом продукции являются теплоизоляционные плиты.

Согласно представленным данным, размещение предприятий, производящих вспененную продукцию из полистирола, крайне неравномерно. Можно предположить, что потребление такой продукции более равномерно, хотя данные о потребителях (промышленные предприятия, строительный сектор, население) отсутствуют. Одним из показателей для оценки техногенной нагрузки, связанной с использованием изделий из вспененных продуктов полистирола, является потребление на душу населения. По состоянию на 2020 г., исходя из данных официальной статистики, этот показатель для Беларуси составляет приблизительно 1,41 кг/чел. (для сравнения: в Германии – 4 кг/чел., в России – 0,7 кг/чел.).

**Образование отходов полистирола.** Непосредственно производство пенополистирола и экструдированного полистирола считается безотходным, поскольку остатки полистирола (крошка) от производства включаются в технологический процесс. На вторичную переработку поступают и отходы производства изделий из ударопрочного полистирола. Вместе с тем, согласно статистическим данным, в Беларусь образуются отходы полистирола, которые учитываются под следующими кодами в соответствии с общегосударственным классификатором Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь»: 5710800 (Полистирол и пенопласт на его основе, сополимеры стирола), 5710801 (Полистирол), 5710802 (Полистирол загрязненный), 5710803 (Пенопласт полистирола), 5710804 (Отходы пенопласта (полосы и обрезки) производства пенопласта на основе эмульсионного полистирола), 5710831 (Вышедшие из употребления изделия и материалы из полистирола и его сополимеров), 5710833 (Отходы полистирола и его сополимеров при производстве формовых). Указанные категории отходов являются либо сырьем, либо фрагментами готовых изделий, образованных в процессе как производства, так и эксплуатации готовой продукции. Следует отметить, что отходы под кодами 5710801, 5710802, 5710831, 5710833 либо не включают вспененный полистирол, либо включают помимо пенопласта и другие виды стирольных полимеров, например общего назначения или ударопрочный. Соответственно, отходами производства вспененных материалов из полистирола являются отходы с кодами 5710800, 5710803 и 5710804.

Общие объемы образования отходов полистирола в 2020 г. составили 7,2 тыс. т, из которых около 8 % (или 0,55 тыс. т) представлено отходами пенопласта (рис. 5). Среди анализируемых отходов доминируют отходы под названием «отходы полистирола», на долю которых приходится 69 % общего объема их образования. Почти четверть отходов (22 %) представлена вышедшими из употребления изделиями и материалами из полистирола.

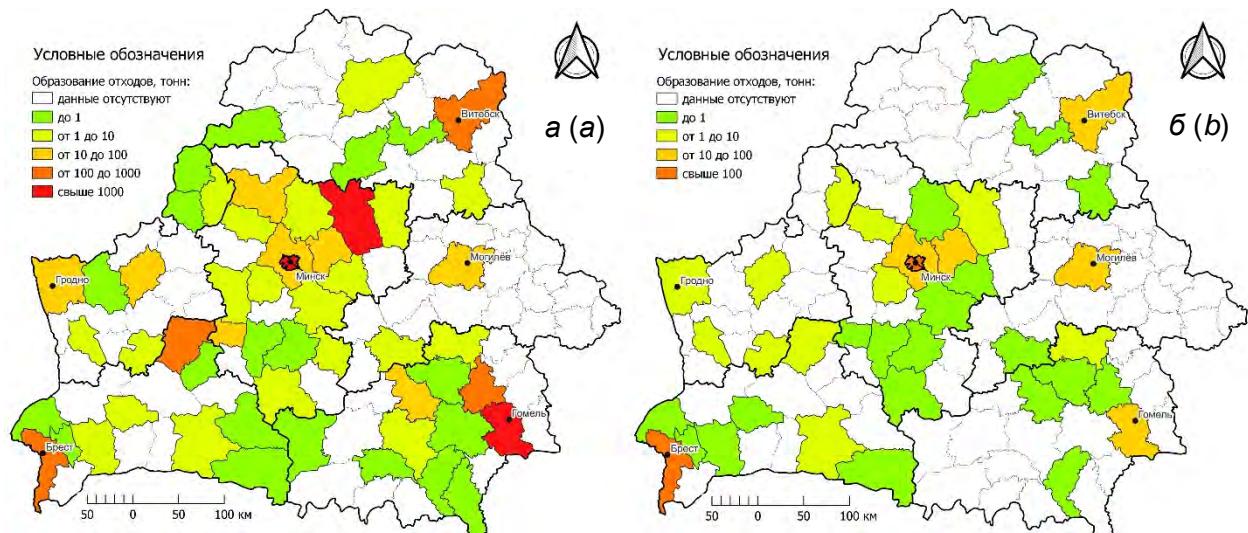


**Рис. 5. Структура образования отходов полистирола на территории Беларусь (по данным Бел НИЦ «Экология»), 2020 г.**

**Fig. 5. The structure of polystyrene waste generation on the territory of Belarus (according to Bel NIC "Ecologiya"), 2020**

Пространственное распределение отходов полистирола на фоне высокой доли административных районов, для которых информация отсутствует, весьма неравномерно (рис. 6). Для отходов вспененных материалов из полистирола (коды 57108000, 5710803 и 5710804) характерны более высокие уровни накопления в пределах административных районов с областными городами. Максимальный уровень образования данной категории отходов (более 100 т) в Брестском районе, вероятно, объясняется наличием производств, использующих одноразовую упаковку для перевозки продуктов.

Отходы полистирола под названием «Полистирол» и «Вышедшие из употребления изделия и материалы из полистирола и его сополимеров» также распределены неравномерно. Так, в двух районах (Гомельском и Борисовском) объемы образования превышают 1000 т/год, а в четырех районах составляют от 100 до 1000 т/год. Следует отметить, что 70 % (или 3,45 тыс. т) от общего количества отходов под названием «Полистирол» образуется в Гомельском районе. В то же время в 19 районах образование отходов полистирола не превышает 1 т, а для 64 районов такая информация отсутствует.



**Рис. 6. Распределение отходов полистирола (т) на территории Беларуси по административным районам, 2020 г.: а – всех отходов полистирола; б – отходов пенополистирола**

**Fig. 6. Distribution of polystyrene waste (t) on the territory of Belarus by administrative districts, 2020:  
a – all polystyrene waste; b – polystyrene foam waste**

Рассматривая номенклатуру и объемы образования отходов необходимо подчеркнуть, что информация касается отходов, образующихся на промышленных предприятиях, в строительстве, на транспорте, в сфере услуг и в коммунальном секторе. Однако пространственный анализ распределения отходов по административным районам показал, что практически для половины территории страны отсутствуют данные официальной статистики. Представляется, что таким образом объемы образования отходов полистирола недоучитываются.

На территории страны нет действующего норматива образования отходов при производстве полистирола беспрессовым способом. Согласно приказу Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 11.05.2011 № 200-ОД, в стране установлен норматив образования отходов производства пенополистирола эмульсионного марок (ПС-1 и ПС-4) в диапазонах от 0,015 до 0,035 т на 1 т готовой продукции. К большинству производств в стране данный норматив малоприменим, поскольку эмульсионный полистирол, получаемый прессовым способом, на данный момент не используется (или практически не используется). Взамен эмульсионного применяется сырье, произведенное супензионным беспрессовым способом. Вместе с тем производство прессового и беспрессового полистирола имеет схожий процесс. Принимая вышеуказанные удельные показатели, можно предположить, что объемы образования отходов полистирола могут быть существенно более высокими по сравнению с данными официальной статистики. Несмотря на минимизацию отходов полистирола за счет его рециклинга, полное возвращение полистирола в цикл производства практически невозможно, поскольку часть сырья и фрагментов попадает в отходы и выносится за пределы производственных цехов.

Следует отметить также, что образование отходов полистирола, в первую очередь из вспененных материалов, характерно и в бытовом секторе, так как использование утеплителей из полистирола имеет большую популярность в гражданском строительстве.

**Пути поступления полистирола в окружающую среду.** Натурные исследования на предприятиях по производству пенополистирольных плит показали, что полистирол вспенивающийся может попадать в окружающую среду практически на всех этапах производственного процесса, начиная с приемки сырья и заканчивая хранением готовой продукции (табл. 2). При этом частицы полистирола могут быть представлены как микропластиком (в случае рассеяния сырья или измельчения изделий/отходов пенополистирола), так и макропластиком различного размера.

При сообщении цехов с открытой промплощадкой возможен перенос частиц на нее ветром или обслуживающим персоналом (ключевую роль здесь играет накопление статического заряда на шариках полистирола и возможность его примагничивания к одежде и рабочей обуви персонала). При попадании на промплощадку любого вида полистирола основными факторами, способствующими его выносу, являются ветровой перенос и ливневый сток. Особую опасность представляют ливневые коллекторы на территории предприятия, поскольку при попадании в них полистирольной крошки или шариков они могут напрямую поступать в водные объекты и в дальнейшем мигрировать на большие

расстояния. Данные процессы миграции сопровождаются выносом частиц в прибрежные зоны при повышении уровня воды, а также осаждением частиц полистирола и попаданием их в донные отложения [20]. Примеры обнаруженных частиц полистирола вблизи промышленных предприятий приведены на рис. 7.

**Таблица 2. Источники образования отходов полистирола при производстве материалов из вспенивающегося полистирола**

**Table 2. Sources of polystyrene waste generation in the production of materials from foaming polystyrene**

Источник поступления	Причина(ы) возникновения	Участок загрязнения	Вид(ы) отходов полистирола
Транспортировка и приемка сырья	Повреждение биг-бэгов (до 1 т), мешков (до 20–30 кг) с сырьем, долговременное хранение открытой тары	Складские помещения / места хранения, промплощадка	Сырье полистирола (гранулы или порошок)
Предвспенивание сырья	При ручной загрузке сырья в аппараты, ручной или не полностью закрытый процесс переноса предвспененных гранул (<0,5 мм) в бункеры для вылежки	Помещения цехов (по предвспениванию, с бункерами для вылежки)	Сырье полистирола, отдельные вспененные шарики
Формование готовых изделий	Образование обрезков или фрагментов плит при горячей нарезке изделий на листы и блоки	Помещения цехов (по формированию и нарезке готовых изделий)	Мелкие обрезки или крошка пенопласта (макро- и микропластик)
Хранение готовой продукции	Повреждение готовой продукции при неосторожном обращении или транспортировке	Склад готовой продукции, промплощадка при организации открытого хранения	Фрагменты, куски или отдельные шарики пенополистирола
Вторичное измельчение частиц или фрагментов	Механическое воздействие обуви или шин спецтехники на полистирол, образующийся от вышеописанных источников	Территория, используемая на всех этапах производства	Крошка или отдельные гранулы и их частицы



**Рис. 7. Примеры рассеяния частиц полистирола за пределами промышленных площадок:**  
а – гранулы пенополистирола около забора предприятия (Дзержинский район);  
б – гранулы пенополистирола в водотоке на выходе из ливневого коллектора (г. Минск)

**Fig. 7. Examples of releases of polystyrene particles outside industrial sites:**  
a – foamed polystyrene beads near the fence of the enterprise (Dzerzhinsky district);  
b – polystyrene granules in the watercourse at the output of the storm collector (Minsk)

Как указано выше, опасность распространения частиц полистирола обусловлена содержащимися в них антипринами, прежде всего ГБЦД. В этой связи важным представляется создание эффективной системы природоохранных мероприятий по предотвращению рассеяния и миграции микрочастиц сырья, а также различных фрагментов пенополистирольных изделий.

**Заключение.** Выполненные исследования показали, что в Беларуси ежегодно используются значительные объемы полистирола вспенивающегося. Насчитывается более 50 промышленных предприятий по производству продукции из данного вида полимерного сырья, которые являются локальными источниками загрязнения окружающей среды частицами полистирола и содержащимися в них антипринами, прежде всего ГБЦД. Высокая пористость пенополистирола и его способность к легкому разрушению с образованием мельчайших фрагментов способствуют широкому распространению микрочастиц в водных и наземных экосистемах, что может привести к негативным последствиям для живых организмов.

Предприятия, использующие вспенивающийся полистирол, расположены крайне неравномерно. Наибольшее их количество размещено в г. Минске и Минской области, что обусловлено потребностью крупного города в строительных материалах. Преимущественное расположение предприятий в пределах водосборов рек Днепра и Немана свидетельствует о необходимости повышенного внимания к возможности распространения и миграции микрочастиц полистирола с водными потоками.

Несмотря на то что производство пенополистирола и экструдированного полистирола считается безотходным, на различных этапах производственного процесса происходит рассеяние гранул/порошка полистирола, а также образование и рассеяние различных фрагментов изделий из пенополистирола. Недостаточная организация сбора и утилизации отходов на промышленных площадках способствует их распространению на обширных территориях.

Для эффективного решения данной проблемы необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на изучение образования отходов производства, уровней содержания загрязняющих веществ в полимерах стирола, а также совершенствование систем контроля над технологическими процессами производства, повышение осведомленности специалистов и потребителей продукции о необходимости ответственного обращения с сырьем и продукцией из полистирола.

#### Список использованных источников

1. Bank, M. S. Microplastic in the Environment: Pattern and Process / M. S. Bank. – 1st ed. – Cham : Springer International Publishing. – 2022. – 354 p.
2. OECD (2022), Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, OECD Publishing, Paris.
3. Cottom, J. W. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution / J. W. Cottom, E. Cook, C. A. Velis // Nature. – 2024. – Vol. 633, № 8028. – P. 101–108.
4. Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: A review / B. J. Seewoo [et al.] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, № 12. – P. E32912.
5. Weathering Plastics as a Planetary Boundary Threat: Exposure, Fate, and Hazards / P. H. Arp [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2021. – Vol. 55, № 11. – P. 7246–7255.
6. Kleshchenkov, A. Microplastic is a problem of planetary scale / A. Kleshchenkov, T. Filatova // Science almanac of Black Sea region countries. – 2019. – № 2. – P. 66–78.
7. Data Bridge Market Research Private. Рынок полистирола: размер, доля, спрос и обзор отрасли к 2030 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-polystyrene-market>. – Дата доступа: 11.09.2024.
8. Secondary microplastics generation in the sea swash zone with coarse bottom sediments: Laboratory experiments / I. Efimova [et al.] // Frontiers in Marine Science. – 2018. – Vol. 5, № SEP.
9. Efimova, I. V. Fragmentation of plastic garbage in the surf zone of the sea: a laboratory experiment on the example of expanded polystyrene / I. V. Efimova, I. P. Chubarenko // Series: Earth Sciences. – 2018. – Vol. 18, № 1. – P. 10–13.
10. Бек-Булатов, А. И. Пенополистирол – история создания и долговечность / А. И. Бек-Булатов // Строительные материалы. – 2010. – № 3.
11. Secretariat of the Stockholm convention Guidance for HBCD / Secretariat of the Stockholm convention [Electronic resource]. – Mode of access: <https://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-NIP-GUID-InVENTORYAndSubstitution-HBCD-201703.En.pdf>. – Date of access: 11.09.2024.
12. Widespread detection of a brominated flame retardant, hexabromocyclododecane, in expanded polystyrene marine debris and microplastics from South Korea and the Asia-Pacific coastal region / M. Jang [et al.] // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 231. – P. 785–794.
13. Carpenter, E. J. Plastics on the Sargasso Sea Surface / E. J. Carpenter, K. L. Smith // Science. – 1972. – Vol. 175, № 4027. – P. 1240–1241.
14. Polystyrene Spherules in Coastal Waters / E. J. Carpenter [et al.] // Science. – 1972. – Vol. 178, № 4062. – P. 749–750.

15. Composition and distribution of beach debris in Orange County, California / S. L. Moore [et al.] // Mar. Pollut. Bull. – 2001. – Vol. 42 (3). – P. 241–245
16. Gordon, M. Eliminating land-based discharges of marine debris in California: a plan of action from the plastic debris project [Electronic resource] / M. Gordon // California Coastal Commission. – 2006. – Mode of access: <https://www.yumpu.com/en/document/view/42231824/eliminating-land-based-discharges-of-marine-debris-in-california>. – Date of access: 18.02.2023.
17. Esiukova, E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia / E. Esiukova // Marine Pollution Bulletin. – 2017. – Vol. 114, № 2. – P. 1072–1080.
18. Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan Cryptopygus antarcticus / E. Bergami [et al.] // Biology Letters. – 2020. – Vol. 16, № 6. doi:10.1098/rsbl.2020.0093
19. Кухарчик, Т. И. Загрязнение почв микропластиком при производстве пенополистирола / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк // Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 370–380.
20. Загрязнение полистиролом прибрежных зон малых рек на урбанизированной территории / Т. И. Кухарчик [и др.] // Природопользование. – 2024. – №. 1. – С. 68–77.
21. Волкова, А. В. Рынок крупнотоннажных полимеров [Электронный ресурс] / А. В. Волкова. – Режим доступа: <https://dccenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Рынок %20крупнотоннажных %20полимеров-2020.pdf>. – Дата доступа: 16.04.2022.
22. European Commission Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs № ENV.G.4/FRA/2007/00 / European Commission [Electronic resource]. – Mode of access: [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/impel\\_report\\_09.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/impel_report_09.pdf). – Date of access: 02.06.2024.
23. Кухарчик, Т. И. Использование гексабромциклогексана в Беларуси, проблемы выявления и предотвращения поступления в окружающую среду / Т. И. Кухарчик, М. И. Козыренко // Весці Нацыянальнай акаадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 74–81.
24. Рузышев, Владимир. Обзор потребительского рынка полистирола России и СНГ [Электронный ресурс] / Владимир Рузышев // The Chemical Journal. – Режим доступа: [https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006\\_1\\_46-53.pdf](https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006_1_46-53.pdf). – Дата доступа: 10.05.2023.
25. Полимерный антиприрен [Электронный ресурс] // АО «Сибур-Химпром». 28.02.2019. – Режим доступа: <https://alphapor.ru/upload/iblock/e0b/e0b4f6278c7d79be53a9d919eb49ab41.pdf>. – Дата доступа: 10.07.2021.
26. СИБУР перешел на производство ПСВ Альфапор с «зеленым антиприреном» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alphapor.ru/news/sibur-pereshel-na-proizvodstvo-psv-alfapor-s-zelenym-antipirenom.php>. – Дата доступа: 10.07.2021.
27. Мировой рынок вспенивающегося полистирола [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.polymery.ru/letter.php?n\\_id=885&cat\\_id=10](http://www.polymery.ru/letter.php?n_id=885&cat_id=10). – Дата доступа: 10.09.2024.
28. Inventra: Полистирол и АБС-пластики 2018 – хорошо будет? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plastinfo.ru/information/articles/664/>. – Дата доступа: 12.09.2024.

## References

1. Bank M. S. Microplastic in the Environment: Pattern and Process. 1st ed. Cham, Springer International Publishing, 2022, 354 p.
2. OECD (2022), Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, *OECD Publishing*, Paris.
3. Cottom J. W., Cook E. Velis, C. A . A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. *Nature*, 2024, vol. 633, no. 8028, pp. 101–108.
4. Seewoo B. J., e.a. Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: a review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 12, pp. E32–912.
5. Arp H. P., e.a. Weathering Plastics as a Planetary Boundary Threat: Exposure, Fate, and Hazards. *Environmental. Science & Technology*, 2021, vol. 55, no. 11, pp. 7246–7255.
6. Kleshchenkov A., Filatova T. Microplastic is a problem of planetary scale. *Science almanac of Black Sea region countries*, 2019, no. 2, pp. 66–78.
7. Data Bridge Market Research Private. *Rynok polistirola: razmer, dolya, spros i obzor otrassli k 2030 godu* [Data Bridge Market Research Private Polystyrene Market: Size, Share, Demand and Industry Outlook to 2030]. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-polystyrene-market> (accessed 11 September 2024). (in Russian)
8. Secondary microplastics generation in the sea swash zone with coarse bottom sediments: Laboratory experiments. *Frontiers in Marine Science*, 2018, vol. 5, no. SEP.
9. Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Kileso A., Chubarenko I. P. Fragmentation of plastic garbage in the surf zone of the sea: a laboratory experiment on the example of expanded polystyrene. *Series: Earth Sciences*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 10–13.
10. Bek-Bulatov A. I. *Penopolistirol – istoriya sozdaniya i dolgovechnost'* [Polystyrene foam – history of creation and durability]. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*, 2010, no. 3. (in Russian)
11. Secretariat of the Stockholm convention Guidance for HBCD. Available at: <https://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-NIP-GUID-InventoryAndSubstitution-HBCD-201703.En.pdf> (accessed 11 September 2024).

12. Mi J., Won J. S., Gi M. H., Manviri R., Young K. S., Sang H. H. Widespread detection of a brominated flame retardant, hexabromocyclododecane, in expanded polystyrene marine debris and microplastics from South Korea and the Asia-Pacific coastal region. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 231, pp. 785–794.
13. Carpenter E. J., Smith K. L. Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science*, 1972, vol. 175, no. 4027, pp. 1240–1241.
14. Carpenter E. J., Anderson S. J., Harvey G. R., Miklas H. P., Peck B. B. Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science*, 1972, vol. 178, no. 4062, pp. 749–750.
15. Moore S. L., Gregorio D., Carreon M., Weisberg S. B., Leecaster M. K. Composition and distribution of beach debris in Orange County, California. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, vol. 42 (3), pp. 241–245.
16. Gordon M. Eliminating land-based discharges of marine debris in California: a plan of action from the plastic debris project. *California Coastal Commission*. 2006. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/42231824/eliminating-land-based-discharges-of-marine-debris-in-california> (accessed 18 February 2023).
17. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, vol. 114, no. 2, pp. 1072–1080.
18. Bergami E., Rota E., Caruso E., Birarda T., Vaccari G., Corsi L. I. Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*, 2020, vol. 16, no. 6. doi:10.1098/rsbl.2020.0093
19. Kukharchyk T. I., Chernyuk V.D. *Zagryazneniye pochv mikroplastikom pri proizvodstve vspenennogo polistirola* [Soil pollution with microplastics in the production of expanded polystyrene]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 2022, no. 3, pp. 370–380. (in Russian)
20. Kukharchyk T. I., Ryabychin K. O., Meleshko A. A., Chernyuk V. D. *Zagryazneniye polistirolom pribrezhnykh zon malen'kikh rek na urbanizirovannoy territorii* [Polystyrene pollution of coastal zones of small rivers in urbanized areas]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 68–77. (in Russian)
21. Volkova A. V. *Rynok krupnotonnazhnykh polimerov – 2020* [Large-Tonnage Polymers Market – 2020]. Available at: <https://dccenter.hse.ru/data/2020/07/07/1595325171/Рынок %20крупнотоннажных %20полимеров-2020.pdf> (accessed 16 March 2022). (in Russian)
22. European Commission Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs № ENV.G.4/FRA/2007/00 / European Commission. Available at: [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/impel\\_report\\_09.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/impel_report_09.pdf) (accessed 02 June 2024).
23. Kukharchyk, T. I., Kozyrenko M. I. *Ispol'zovaniye geksabromtsiklodiodekana v Belarusi, problemy vyyavleniya i predotvratshcheniya postupleniya v okruzhayushchuyu sredu* [Use of hexabromocyclododecane in Belarus, problems of detection and prevention of release into the environment]. *Vestsí Natsyyanal'nay akademíi navuk Belarus'i. Seryya khímichnykh navuk* [News of the National academy of sciences of Belarus. Series of chemical sciences]. 2016, no. 1, pp. 7481. (in Russian)
24. *The Chemical Journal*. Vladimir Rupyshev. *Obzor potrebitel'skogo rynka polistirola Rossii i SNG* [The Chemical Journal. Vladimir Rupyshev. Review of the consumer market of polystyrene in Russia and the CIS]. Available at: [https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006\\_1\\_46-53.pdf](https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006_1_46-53.pdf) (accessed 10 May 2023). (in Russian)
25. *Polimernyy antipiren*. AO "Sibur-Khimprom". [Polymer fire retardant. JSC Sibir-Khimprom]. Available at: <https://alphapor.ru/upload/iblock/e0b/e0b4f6278c7d79be53a9d919eb49ab41.pdf> (accessed 10 July 2021). (in Russian)
26. *SIBUR pereshel na proizvodstvo PSV Al'fapor s "zelenym antipirenom"* [SIBUR Switches to Production of PSV Alfapor with "Green Flame Retardant"]. Available at: <https://alphapor.ru/news/sibur-pereshel-na-proizvodstvo-psv-alfapor-s-zelenym-antipirenom.php> (accessed 10 July 2021). (in Russian)
27. *Mirovoy rynok vspenivayushchesya polistirola* [World market of expanded polystyrene]. Available at: [http://www.polymery.ru/letter.php?n\\_id=885&cat\\_id=10](http://www.polymery.ru/letter.php?n_id=885&cat_id=10) (accessed 10 September 2024). (in Russian)
28. *Inventra: Polistirol i ABS-plastiki 2018 – khorosho budet?* [Inventra: Polystyrene and ABS plastics 2018 – will it be good?]. Available at: <https://plastinfo.ru/information/articles/664/> (accessed 12 September 2024). (in Russian)

#### Информация об авторах

**Кухарчик Тамара Иосифовна** – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

**Рябычин Кирилл Олегович** – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ryabychin.ltp.bas@gmail.com

#### Information about the authors

**Tamara I. Kukharchyk** – D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

**Kirill O. Ryabychyn** – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ryabychin.ltp.bas@gmail.com

## ДИНАМИКА ТЕРМИЧЕСКИХ, ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ЛУКОМЛЬСКОЙ ГРЭС В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Н. Ю. Суховило<sup>1</sup>, В. М. Самойленко<sup>1</sup>, В. В. Вежновец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>ГНПО «НПЦ НАН Беларусь по биоресурсам», Минск, Беларусь

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности зимнего термического, гидрохимического и гидробиологического режима водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС – озера Лукомское в зимний период. Актуальность исследования заключается в необходимости мониторинга качества воды в озере в связи с активизацией лимнических процессов из-за теплового загрязнения. Цель работы – провести комплексное исследование отдельных абиотических и биотических компонентов экосистемы озера Лукомского за период с 1972 по 2024 г.

Отмечена высокая скорость поступления и накопления в водной массе водоема гидрокарбонатов, ионов магния, натрия и хлора при относительном снижении содержания сульфатов и кальция. Среди биогенных элементов наиболее устойчивый рост характерен для соединений фосфора.

Многолетние исследования зимнего фитопланктона водоема-охладителя свидетельствуют об относительном постоянстве структуры сообщества и его доминирующего комплекса. Вспышки развития водорослей в отдельные годы в значительной степени обусловлены погодными условиями.

Видовой состав и структура сообщества зоопланктона в настоящее время типичны для зимнего периода и соответствуют водоемам с низкой трофностью. Сокращение общей численности за счет коловраток и рост биомассы, в значительной степени формируемой крупными ракообразными, свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема-охладителя.

**Ключевые слова:** озеро Лукомское; водоем-охладитель; гидрохимический режим; растворенный кислород; температура воды; фитопланктон; зоопланктон.

**Для цитирования.** Суховило Н. Ю., Самойленко В. М., Вежновец В. В. Динамика термических, гидрохимических и гидробиологических характеристик водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС в зимний период // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 46–60.

## DYNAMICS OF THERMAL, HYDROCHEMICAL AND HYDROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LUKOML SDPP COOLING POND IN WINTER PERIOD

N. Yu. Sukhovilo<sup>1</sup>, V. M. Samoilenko<sup>1</sup>, V. V. Vezhnovets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources", Minsk, Belarus

**Abstract.** The article discusses the features of the winter thermal, hydrochemical and hydrobiological regime of the cooling pond of the Lukomlskaya GRES – Lake Lukomskoe. The relevance of the study lies in the need to monitor the quality of water in the lake due to the activation of limnic processes due to thermal pollution. The purpose of the research was to study individual abiotic and biotic components of the ecosystem of Lake Lukomskoe for the period from 1972 to 2024.

In the ionic structure, it is noted that hydrocarbonates, as well as magnesium, sodium and chlorine ions, are characterized by the highest rate of entry and accumulation in the water mass of the reservoir, with a relative decrease in the content of sulfates and calcium. Among the biogenic elements, the most stable growth is demonstrated by the concentration of phosphorus.

Long-term studies of winter phytoplankton of the cooling pond indicate a relative constancy of the community structure and its dominant complex. Outbreaks of algae development in some years are largely due to weather conditions. The species composition and structure of the zooplankton community are currently typical for the winter period and correspond to reservoirs with low trophicity. The reduction in the total number due to rotifers and the growth of biomass, largely formed by large crustaceans, indicate a decrease in the rate of eutrophication of the cooling reservoir.

**Keywords:** Lake Lukomskoe, cooling pond, dissolved oxygen, water temperature, phytoplankton, zooplankton

**For citation.** Sukhovilo N. Yu., Samoilenka V. M., Vezhnavaets V. V. Dynamics of thermal, hydrochemical and hydrobiological characteristics of Lukoml SDPP cooling pond in winter period. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 46–60.

**Введение.** Стремительное развитие тепловой и атомной энергетики привело к тому, что водоемы-охладители в настоящее время представляют собой достаточно распространенный тип водных объектов. Они подвержены интенсивному антропогенному воздействию и являются объектом пристального внимания экологов и различных природоохранных организаций. Воздействие объектов энергетики на экосистемы водоемов-охладителей носит многоплановый характер. Оно заключается в заметном изменении не только их температурного режима, но и гидрологических и гидродинамических показателей, загрязнении вод различными агентами со стороны как собственно электростанции, так и различных бытовых и производственных служб, в той или иной мере с ней связанных.

Подогрев может как оказывать позитивное воздействие на гидробионтов, так и становиться причиной их массовой гибели при повышении температуры воды до экстремального уровня. Помимо прямого воздействия повышение температуры воды способно оказывать значимые косвенные воздействия. Среди них следует отметить термическое эвтрофирование – увеличение продуктивности экосистемы в целом.

Помимо прочего, повышение температуры воды создает условия для вселения в водоемы-охладители и развития в них теплолюбивых видов гидробионтов.

Ухудшение качества вод может создать серьезные помехи в системе технического водоснабжения электростанции и даже привести к возникновению чрезвычайной ситуации в ее работе. Примерами могут служить бурные «цветения» фитопланктона или интенсивное зарастание макрофитами, вызванное эвтрофированием вод.

В связи с этим экологический мониторинг экосистемы водоемов-охладителей в настоящее время является достаточно актуальной проблемой.

Основная цель работы – выполнить комплексное исследование отдельных абиотических и биотических компонентов экосистемы оз. Лукомское в зимний период.

**Материалы и методы исследования.** Озеро Лукомское – один из наиболее крупных водоемов Беларуси. С середины 1960-х годов функционирует в качестве водоема-охладителя Лукомльской ТЭС с установленной мощностью 2444,5 МВт. Его экосистема на протяжении последних 50 лет кроме теплового испытывает другие виды антропогенного воздействия, среди которых наибольшее негативное влияние оказывает садковый комплекс по выращиванию рыбы. Комбикорм, используемый для кормления рыбы, является мощным дополнительным источником биогенных веществ, в частности фосфора, ответственного за скорость и интенсивность эвтрофирования водоема.

Площадь акватории оз. Лукомское составляет 37,7 км<sup>2</sup>. В северной его части имеется пять небольших островов общей площадью 0,07 км<sup>2</sup>. Котловина озера подпрудного типа, овальной формы, вытянута с севера на юг на 10,4 км, расширяется в центре до 6,5 км (при средней ширине 3,5 км). Озеро неглубокое: максимальная глубина равна 11,5 м, средняя – 6,6 м. На долю глубин до 2,0 м приходится около 11 % площади акватории, в то время как глубины более 4,0 м занимают 77 %. Основные морфометрические характеристики озера приведены в таблице, картосхема глубин – на рис. 1.

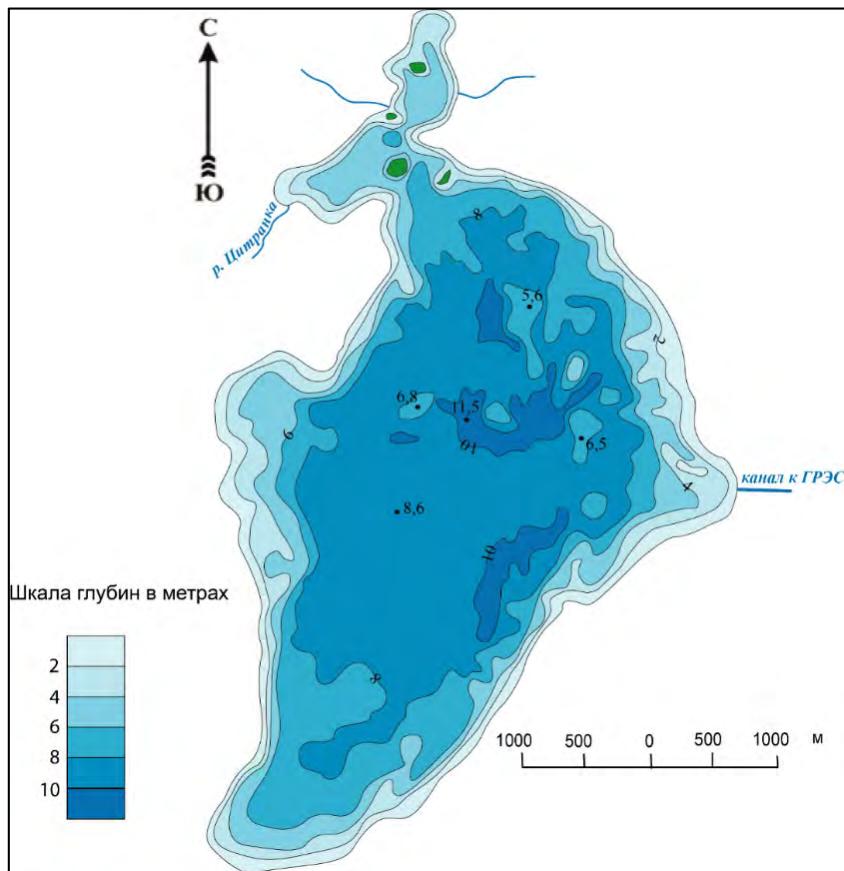
#### Морфометрические характеристики озера Лукомское [1]

#### Morphometric characteristics of Lake Lukomskoe [1]

Характеристика	Единица измерения	Значение	Характеристика	Единица измерения	Значение
Площадь	км <sup>2</sup>	37,7	Длина береговой линии	км	36,4
Длина	км	10,4	Объем водной массы	млн м <sup>3</sup>	249
Ширина максимальная	км	6,5	Площадь водосбора	км <sup>2</sup>	172,34
Глубина максимальная	м	11,5	Период водообмена	лет	7,2
Глубина средняя	м	6,6		–	–

Площадь водосбора оз. Лукомское (без площади озера) по результатам расчета с помощью цифровой модели рельефа с разрешением 10 м/пикс. составляет 172,34 км<sup>2</sup>. Доля земель, занятых лесами и древесно-кустарниковой растительностью, – 52,8 % водосбора (91,0 км<sup>2</sup>), заболоченность – 1,9 % (3,25 км<sup>2</sup>). Площадь сельскохозяйственных земель – 59 км<sup>2</sup> (34,2 % площади водосбора). Населенные пункты занимают 14,4 км<sup>2</sup>, или 8,3 % водосбора, водные объекты – 1,85 км<sup>2</sup>, или 1,07 % водосбора. На иные земли (дороги, рекреационные объекты) приходится 2,84 км<sup>2</sup>, или 1,6 % водосбора.

Исходными данными для проведения исследования послужили фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории (далее – НИЛ) озероведения и Белгидромета [2] за период с 1972 по 2024 г. Основными методами исследования были полевой, лабораторный, системного анализа, сравнительно- и эколого-географический, методы математической статистики (регрессионный, корреляционный анализ).



**Рис. 1. Батиметрическая схема озера Лукомское**

**Fig. 1. Bathymetric map of Lake Lukomskoe**

Измерение температуры воды производили со льда или с лодки ртутным термометром, встроенным в батометр. Измерение прозрачности воды выполняли с помощью диска Секки.

Анализ проб воды до 2012 г. осуществляли в НИЛ озероведения Белорусского государственного университета, после – в лаборатории Института природопользования НАН Беларуси (Г. М. Бокая). В ходе анализа определяли такие показатели, как минерализация воды, концентрация главных ионов, минеральных форм азота и фосфора, железа общего, цветность, pH (дополнительно с помощью pH-метра Hanna Instruments осуществляли измерения во время проведения полевых исследований).

Отбор проб производили батометром Молчанова в пелагической части, покрытой льдом, в точке максимальной глубины с разных горизонтов. Затем пробы фиксировали раствором Утермёля с последующим добавлением формалина. Для концентрации проб применяли отстойный метод. Численность клеток подсчитывали в камере Фукса – Розенталя. Расчеты биомассы проводили по методу геометрического подобия [3, 4].

Отбор проб зоопланктона производили с помощью пятилитрового планктоночерпателя Вовка в модификации Щербакова. На орудии лова использовали шелковое сите № 70. Пробы фиксировали 4%-ным раствором формалина. Для определения численности зоопланктона пробы полностью просчитывали под бинокуляром в камере Богорова. Для расчета биомассы зоопланктона определяли среднюю длину тела в популяциях веслоногих ракообразных отдельно для взрослых особей, копеподитов и науплиусов. Индивидуальную массу животных измеряли по формуле связи массы и размеров тела [5] с использованием коэффициентов  $a$  и  $b$  для планктонных ракообразных и коловраток ( $e = 3$ ) [6].

**Результаты и их обсуждение.** Термический режим оз. Лукомское определяется его географическим положением в умеренном климатическом поясе. Это обуславливает почти ежегодное (исключение – зима 2019/20 гг.) формирование ледового покрова на большей части акватории.

В зимний период зона влияния Лукомльской ГРЭС значительно меняется по площади, что отражено на рис. 2 на примере зимы 2023/24 гг. В начале января 2024 г. почти вся акватория озера была покрыта льдом (см. рис. 2, а). Небольшие полынины наблюдались только в месте сброса теплой воды с ГРЭС, а также в устье водоотводящего канала. К концу февраля площадь ледового покрова сокращалась (см. рис. 2, б). Ширина полосы открытой воды менялась слабо и была равна 700–800 м, площадь составила 4,5 км<sup>2</sup>, или 12 % акватории. В 2022 г. во время полевого обследования 19–20 февраля площадь акватории, свободной ото льда, была в 3 раза больше. Аномально теплой зимой 2020 г. ледовый покров не формировался. На отдельных участках западного берега при похолоданиях образовывались забереги.

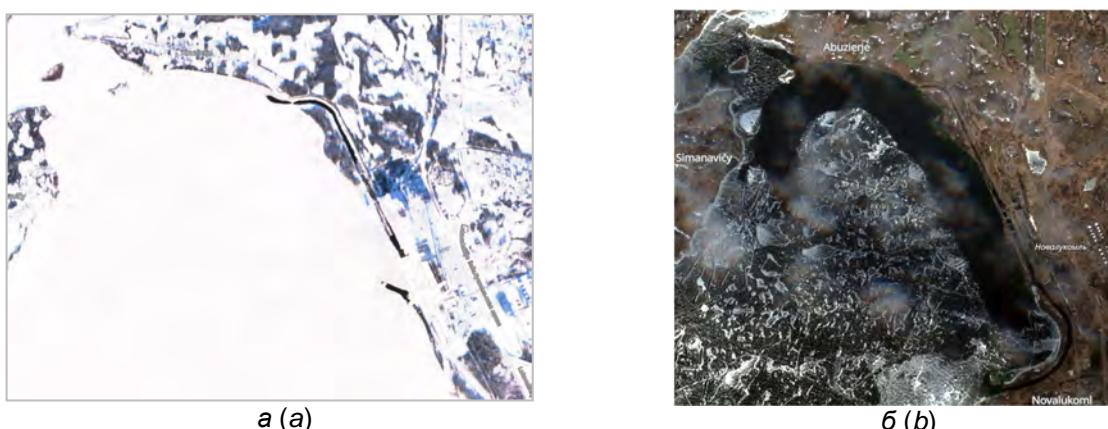


Рис. 2. Изменение площади акватории оз. Лукомское, свободной ото льда, 08.01.2024 (а) и 27.02.2024 (б) по данным космического аппарата Sentinel 2

Fig. 2. Change in the ice-free area of Lake Lukomskoe on 08.01.2024 (a) and 27.02.2024 (b) according to data from the Sentinel 2

Подледные температуры воды у поверхности в период полевых наблюдений НИЛ озероведения выше, чем в озерах, не подверженных тепловому загрязнению, и составляют около 1,0–1,6 °С. По данным Белгидромета, они совпадают с температурами воды в ненарушенных озерах. Обратная температурная стратификация практически полностью отсутствует. 21 февраля 2024 г. температура воды на мониторинговой вертикали, расположенной вне зоны подмеса теплых вод, увеличивалась от 1,6 °С у поверхности до 2,8 °С у дна, как показано на рис. 3.

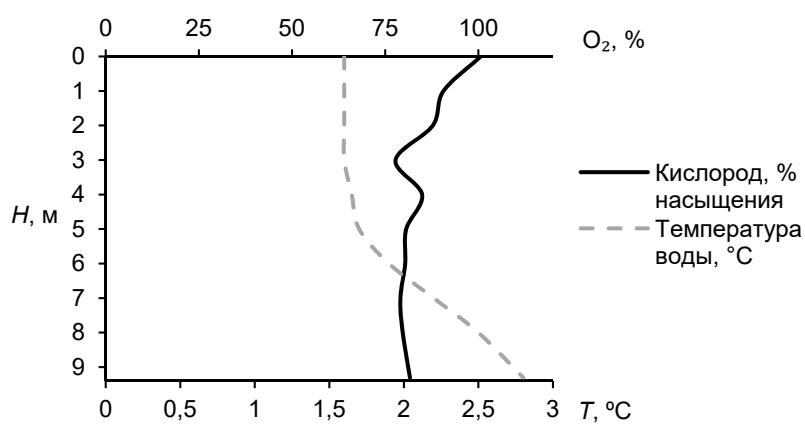


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры воды и растворенного кислорода на мониторинговой вертикали вне зоны влияния ГРЭС

Fig. 3. Vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen at the monitoring vertical in zone without the influence of SDPP

В 2022 г. вертикальный температурный градиент был еще более слабым. Температура воды увеличивалась от 1,2 °С у поверхности до 1,8 °С у дна. Во время наблюдений зафиксированы случаи с более низкими температурами воды: 14 марта 2004 г. во время ледостава по всей толще они равнялись 0,2–0,4 °С. Аналогичные кривые вертикального распределения температур отмечались также в предледственный период с интенсивным выхолаживанием на фоне активного ветрового перемешивания. Классическая обратная стратификация с температурами около 4 °С у дна и близкими к нулю у поверхности сотрудниками НИЛ озероведения не фиксировалась, однако встречается в материалах наблюдений Белгидромета [2].

Химический состав озерных вод формируют факторы, среди которых наиболее важными являются природные (физико-географические условия, характер водосборной площади, морфология озерной котловины, водообмен, объем и состав приточных вод) и антропогенные (поступление биогенных и загрязняющих веществ, изменение температуры вод и водного баланса). Факторы воздействия подразделяются на внешние и внутриводоемные процессы.

Основу гидрохимического режима образуют площадное, вертикальное и межсезонное распределение температуры, растворенных газов, состава и количество основных ионов минерализации ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ), питательных веществ соединений азота и фосфора ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_{\text{общ}}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{P}_{\text{общ}}$ ), растворенное и взвешенное органическое вещество, микроэлементы и тяжелые металлы.

Вертикальное распределение растворенного кислорода в зимний период по данным наблюдений последних лет характеризуется как равномерное по всей водной толще с небольшим максимумом у поверхности. Газовый режим оз. Лукомское в период зимней стагнации имеет незначительный дефицит кислорода у дна. Зимой 2024 г. его концентрация в поверхностном горизонте в точке контроля составляет 14,1 мг/дм<sup>3</sup>, постепенно снижаясь с глубиной до 10,9 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует 77–100 % насыщения и укладывается в диапазон многолетних колебаний. При такой концентрации кислорода в зимнее время заморы рыбы не возникают, однако в период ледостава необходим оперативный контроль за содержанием растворенного кислорода для принятия своевременных мер по недопущению заморов.

По величине минерализации озеро занимает промежуточное положение между более минерализованными озерами степной зоны и слабоминерализованными водоемами севера Европейской части. Согласно классификации О. А. Алекина [7], вода в оз. Лукомское относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы второго типа, для которого характерно следующее соотношение главных ионов:  $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ . В последние 20 лет ионы магния зачастую преобладают над ионами кальция.

В зимний период минерализация воды в открытой части оз. Лукомское колеблется от 208,7 (1984 г.) до 307,2 мг/дм<sup>3</sup> (1998 г.) с тенденцией к увеличению в 1980–90-х годах и последующей стабилизацией. Аналогичный тренд наблюдается и в динамике минерализации воды в пробах, отобранных в июле и августе. В феврале 2024 г. минерализация воды в поверхностном слое изменяется по акватории незначительно: от 247,2 мг/дм<sup>3</sup> в Гурецкой луке (северо-западном заливе) до 273,9 мг/дм<sup>3</sup> в центре, юго-западной части озера. Различия в содержании ионов по вертикали более контрастны. Наибольшая их концентрация отмечена в придонных слоях северного залива (281,2 мг/дм<sup>3</sup>). Причины такой повышенной концентрации можно связать с изменением водного баланса в холодное время года в сторону увеличения подземного питания и отсутствия активного динамического перемешивания.

Как и в большинстве озер гумидной зоны умеренного климатического пояса, в воде озера преобладает гидрокарбонат-ион. Его концентрация в зимний период колеблется от 140,3 до 195,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Сульфат-ион ранее занимал второе место среди анионов после гидрокарбонат-иона. Источниками этих соединений являются промышленные и коммунальные сточные воды, удобрения и др. Большой вклад вносят атмосферные осадки в результате загрязнения атмосферы соединениями серы в результате сгорания топлива, нефтепродуктов, торфа и др. Концентрация сульфатов в среднем составляет 21,8 мг/дм<sup>3</sup> и колеблется от 3,1 мг/дм<sup>3</sup> в 2018 г. до 39,2 мг/дм<sup>3</sup> в 2001 г. В ее многолетней динамике отмечается период роста, продлившийся до начала XXI в. с дальнейшим снижением до уровня конца 1970-х годов. Это объясняется как переходом ГРЭС на природный газ, так и общим снижением промышленных выбросов в атмосферу.

Хлориды являются показателями загрязнения воды промышленными, хозяйствственно-бытовыми и сельскохозяйственными стоками. Концентрация хлоридов за период исследований оз. Лукомское выросла более чем в 4 раза: с 6,4 мг/дм<sup>3</sup> в 1976 г. до 28,2 мг/дм<sup>3</sup> в 2013 г. В настоящее время концентрация хлоридов часто превышает концентрацию сульфатов.

Диапазоны колебаний концентраций главных ионов приведены на рис. 4.

Среди катионов ведущая роль на протяжении долгого времени принадлежала иону кальция. Его концентрация постепенно снижается: с 40–45 до 31–37 мг/дм<sup>3</sup>. В абсолютном выражении кальций все

еще преобладает над магнием (в среднем – 13,8 мг/дм<sup>3</sup> при диапазоне колебаний 6,6–24,3 мг/дм<sup>3</sup>), но в относительном выражении наблюдается смена группы вод с кальциевой на магниевую.

Натрий-ион демонстрирует динамику, схожую с сульфатами, с максимумом концентрации (до 18,3 мг/дм<sup>3</sup>) в начале 2000-х годов. Концентрация ионов калия не превышает 4,1 мг/дм<sup>3</sup>.

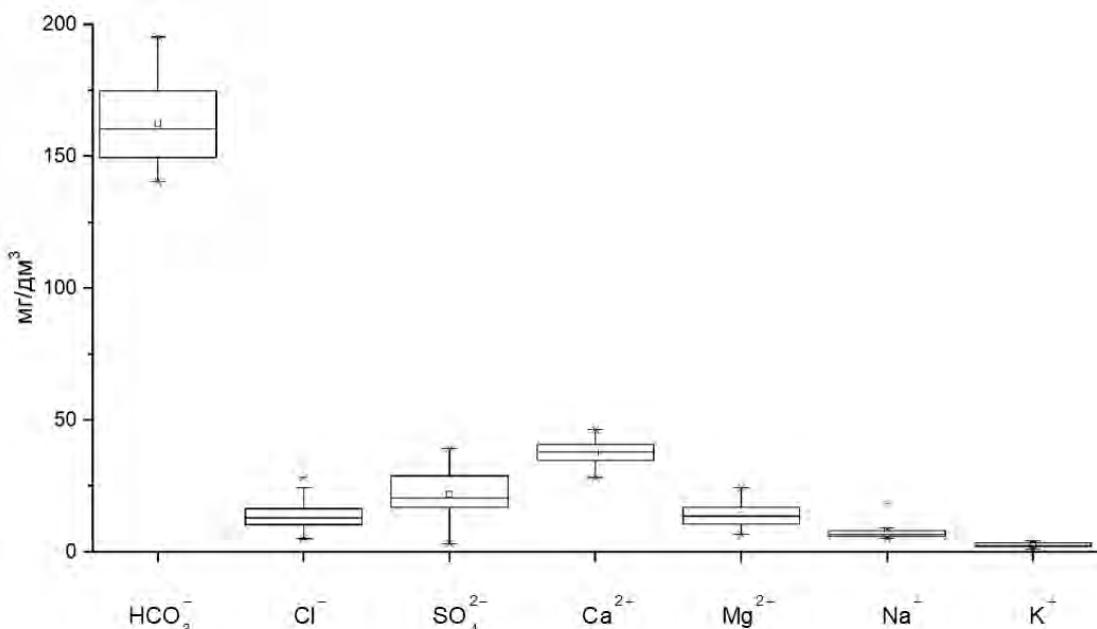


Рис. 4. Диапазоны колебаний концентраций главных ионов в зимний период в воде оз. Лукомское

Fig. 4. Ranges of fluctuations in concentrations of the main ions in the water of Lake Lukomskoe in winter

При оценке состояния и функционирования водных экосистем важным этапом является анализ содержания биогенных элементов. Они активно участвуют в биопродукционных процессах, определяют интенсивность формирования первичной продукции. Концентрация в воде водоемов биогенных веществ, в первую очередь общего азота и общего фосфора, служит эффективным показателем трофического состояния водоемов.

Анализ многолетних наблюдений позволяет проследить динамику и сделать определенные обобщения количественного содержания соединений азота и фосфора в воде оз. Лукомское. Минеральные формы азота в воде водоемов представлены ионами аммония, нитритами, нитратами, переходящими в водной массе из одной формы в другую в результате деятельности соответствующих видов бактерий. Круговорот азота включает процессы азотфиксации, нитрификации, аммонификации, денитрификации, которые замыкаются на поступлении газообразного азота в водоем из атмосферы и выделении его обратно в атмосферу.

За период наблюдений значения соединений азота изменились в широком интервале: аммонийного азота – 0,0–2,16 мг/дм<sup>3</sup>; нитратного – 0,0–0,50; нитритного – 0,0–0,02 мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшим динамическим изменениям за период наблюдения подвергалось содержание иона аммония ( $\text{NH}_4^+$ ). Наличие в водах озера иона аммония связано с биохимическими процессами разложения белковых веществ, соединений азота. Большая часть ионов аммония попадает в воду со стоками животноводческих ферм, сельскохозяйственных полей, промышленных предприятий. Можно предположить, что основным источником поступления аммонийного азота служат неутилизированные комбикорма садкового комплекса. Концентрация нитратов меняется менее существенно. Самая неустойчивая форма – нитрит-ион – подвержена незначительным колебаниям.

Фосфор – основной эвтрофирующий элемент, высокая концентрация которого свидетельствует о низком качестве воды. По данным наблюдений, на фоне общей многолетней тенденции возрастания концентрации фосфора минерального в воде озера выявлены периоды пикового повышения концентрации в 1980 г., 1988–1989 гг. и 2022 г. (максимум – 0,111 мгР/дм<sup>3</sup>). В 1998 г. отмечен минимум (0,002 мгР/дм<sup>3</sup>) Постепенный рост концентрации фосфора объясняется тем, что реальная фосфорная нагрузка на озеро составляет 0,099 гР/м<sup>2</sup>, что совпадает с критической. На фоне превращения водоема в бессточный путем строительства плотины на р. Лукомка происходит постепенная аккумуляция

фосфора в воде и донных отложениях. Диапазоны многолетних колебаний концентрации минеральных форм биогенных элементов отражены на рис. 5.

Концентрация железа общего не превышает ПДК ( $0,1 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ).

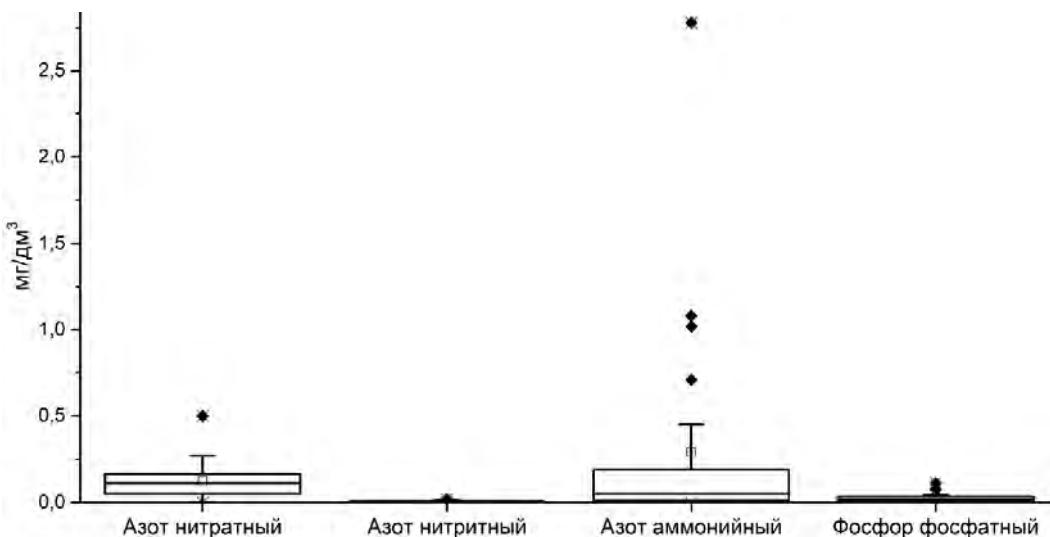


Рис. 5. Диапазоны колебаний концентраций биогенных элементов в зимний период в воде оз. Лукомское

Fig. 5. Ranges of fluctuations in concentrations of the biogenic elements in the water of Lake Lukomskoe in winter

Оптические свойства воды характеризуются такими основными параметрами, как прозрачность и цветность. Прозрачность воды по диску Секки в зимний период варьировала от 3 м в 2013 г. до 5,9 м в 2018 г. при среднем значении около 4,5 м. Для сравнения: в летний период этот показатель составлял от 0,9–1,3 м (в начале 2000-х годов и 2016 г.) до 3,6–4,6 м (в конце 1970-х – начале 1980-х годов). Цветность воды зимой меняется от  $8^\circ$  до  $42^\circ$ ; в последние годы ее значения преобладают в диапазоне от около  $11^\circ$  до  $14^\circ$ . Водородный показатель в период зимних съемок колеблется от нейтрального (7,15) до щелочного (8,45). Ярко выраженные тренды в динамике этих показателей отсутствуют.

Таким образом, в ионной структуре отмечено, что наиболее высокой скоростью поступления и накопления в водной массе водоема характеризуются гидрокарбонаты, а также ионы магния, натрия и хлора при относительном снижении содержания сульфатов и кальция. Среди биогенных элементов наиболее устойчивый рост демонстрирует концентрация фосфора. Соединения азота постоянно переходят из одной формы в другую и выраженных односторонних трендов не имеют. Лишь в случае нитрит-иона можно говорить о снижении его концентрации в зимний период.

Гидробиологические исследования водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС чаще всего приурочены к периоду открытой воды. Результаты исследований представлены в многочисленных статьях и монографии [8–13]. Зимний режим изучен в отдельные годы с конца февраля по начало марта, когда в большинстве озер умеренной зоны наблюдается минимум его развития. В исследуемый период формирование, существование и длительность ледового покрова значительно различаются и определяются как природно-климатическими условиями, так и антропогенным воздействием, в частности работой ГРЭС. Особенностью зимнего сезона 2019/20 гг. является полное отсутствие ледостава на водоеме-охладителе; в 2024 г. практически вся акватория была покрыта льдом, за исключением небольшого участка в районе сброса теплой воды.

В условиях низких температур и пониженного уровня освещенности складываются специфические альгоценозы, в которых преобладают диатомово-криптофитовые комплексы водорослей. Большинство криптофитовых и некоторые диатомовые способны к гетеротрофному типу питания в условиях ограниченного поступления света. Установлено, что в зимний период во многих озерах, расположенных в разных климатических зонах Европы, Азии и Северной Америки, в фитопланктоне развиваются именно флагелляты [14, 15]. Кроме того, развитие фитопланктона в подледный период в озерах умеренной зоны сходно с таковым в полярных и арктических озерах, полностью и постоянно покрытых ледяным панцирем, в планктоне которых также развиваются флагелляты, особенно криптофитовые [16].

Видовое разнообразие зимних альгоценозов значительно беднее, чем в другие сезоны. В разные годы в их составе насчитывалось от 6 (2018 г.) до 33 (2004 г.) таксонов, при среднем количестве 19 таксонов. В то время как в августе, число таксонов укладывалось в пределы 37–109 и в среднем по данным многолетних исследований составляло 78 таксонов.

За весь период исследований в зимнем планктоне идентифицировано 77 таксонов водорослей: 7 цианопрокариот, 22 зеленых, 24 диатомовых, 9 криптофитовых, 4 динофитовых, 7 золотистых, 3 эвгленовых, 1 желто-зеленая. Большинство обнаруженных видов вегетируют и в период открытой воды. Основу фитопланктона составляют эвритеческие виды.

Большинство вегетирующих подо льдом видов представлены немногочисленными популяциями. В заметных количествах обычно развиваются 1–4 вида. В 1970–80-е годы комплексы доминант или субдоминант возглавляли диатомовые рода *Cyclotella*, преимущественно *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm. var. *radiosa* или *Cyclotella ocellata* Pant., которые в дальнейшем утратили свое доминирующее положение. Возрастание их роли вновь отмечено в 2022 г., когда относительная численность *C. radiosa* достигла 52 %. В настоящее время на долю циклотелл приходится 23 % всей численности фитопланктона.

Как отмечалось выше, преобладание жгутиковых форм, принадлежащих к разным отделам, в зимнем фитопланктоне характерно для озер разного трофического типа [17, 18]. В водоеме-охладителе Лукомльской ТЭС круглогодично наблюдается массовая вегетация мелкой криптофитовой водоросли *Rhodomonas pusilla* (Bachm.) Javor var. *pusilla*. Родомонас входит в число массовых видов и в подледном планктоне; его обилие в разные годы колебалось от 0,203 до 1,25 млн кл/дм<sup>3</sup>. До 2012 г. заметного развития достигала еще одна криптомонада – *Cryptomonas erosa* Ehr. с численностью, не превышающей 0,4 млн кл/дм<sup>3</sup>. Довольно часто обильными были золотистые водоросли, среди которых преобладал *Chrysisalis peritaphrena* J. Schiller. Данный вид замечен на протяжении всего года. В осенне-зимний период его активная вегетация отмечалась и в других озерах Беларуси [19]. Максимум развития хризидалиса отмечен в марте 2012 г. – 1,79 млн кл/дм<sup>3</sup>, что соответствует 40 % суммарного показателя.

Таким образом, в условиях низких температур воды и пониженного уровня освещенности в водоемах формируются специфические альгоценозы, в которых преобладают диатомово-криптофитовые комплексы водорослей. Большинство криптофитовых и некоторые диатомовые водоросли способны к гетеротрофному типу питания в условиях ограниченного поступления света. Наиболее типичный комплекс доминант зимнего фитопланктона водоема-охладителя выглядит следующим образом: криптомонада *Rh. pusilla*, один из видов диатомовых рода *Cyclotella* или *Asterionella formosa*, к которым часто присоединяется хризидалиса *Chr. peritaphrena*.

Теплолюбивые цианопрокариоты встречаются спорадически и представлены ограниченным числом видов, из которых чаще преобладает *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom. Численность планктонтрика не превышает 0,225 млн кл/дм<sup>3</sup>, и только в феврале 2020 г., в условиях отсутствия ледового покрова, массовое развитие данного вида (2,87 млн кл/дм<sup>3</sup>) вывело его в разряд доминант. В остальное время планктонтрикс отмечался единично, либо вовсе отсутствовал. В марте 2005 г. заметной была *Gloeocapsa minima* (Keissl) Hollerb. ampl. f. *minima* (0,366 млн кл/дм<sup>3</sup>).

По биомассе часто доминировали «случайные» виды, встречающиеся единично, за счет крупных размеров клеток. Обычно это представители криптофитовых рода *Cryptomonas*. К примеру, в 2022 г. максимальную биомассу формировал *Cryptomonas ovata* Her. (25 %), при этом его обилие не превышало 1 % суммарного значения.

Несмотря на то что подогрев воды за счет сброса с системы охлаждения электростанции увеличивает длительность вегетационного периода, в развитии фитопланктона водоема-охладителя наблюдается четко выраженная сезонная динамика. Как и в большинстве водоемов умеренной зоны, в сезонной динамике фитопланктона оз. Лукомское на этот период приходится зимний минимум вегетации водорослей. Соотношение значений количественных параметров сообщества в период летней стагнации и подледного периода в значительной степени характеризует экологическое состояние и степень трансформации продукции-деструкционных процессов в экосистеме. При интенсивном антропогенном эвтрофировании это соотношение достигает высоких значений. В отдельные годы численность летом была в 1,8–2,8 раза выше, чем зимой (1975, 2012 и 2020 г.); биомасса при этом могла отличаться незначительно. В периоды интенсификации антропогенного воздействия (повышение фосфорной нагрузки) эта разница была крайне высокой. Численность в летний период превышала таковую зимой в 38 раз (2005 г.), 50 раз (2004 г.), 130 раз (2018 г.), а биомасса – в 14, 17 и 53 раза соответственно. Исключением является 1989 г., когда годовой максимум численности и биомассы приходился на март при массовом развитии зеленой жгутиковой *Chlamidomonas* sp. Отсутствие более-менее четкой закономерности в сезонных изменениях свидетельствует о неустойчивости экосистемы водоема в условиях резкого и разнонаправленного действия антропогенных факторов.

В последние 20 лет колебания численности зимнего фитопланктона незначительны: максимальное значение превышает минимальное в 3 раза. Наиболее интенсивное развитие водорослей отмечено в 2020 г. при отсутствии ледостава. Суммарная численность достигла 4,77 млн кл/дм<sup>3</sup> в результате массовой вегетации цианопрокариоты *P. agardhii*, формирующей 6 % общего показателя. Близкое значение численности (4,52 млн кл./дм<sup>3</sup>) характерно и для марта 2012 г., когда в условиях гомотермии и температуре воды 3,5 °C, доминировали золотистая *Chr. peritaphrena* и криптофитовая *Rh. pusilla*.

Наименьшая плотность (0,34 млн кл/дм<sup>3</sup>) зафиксирована в 2018 г. при массовом развитии *A. formosa*, вклад которой в показатели суммарной численности и биомассы достигает 80 %. В последние две съемки уровень развития и структура численности сообщества были аналогичны (рис. 6).

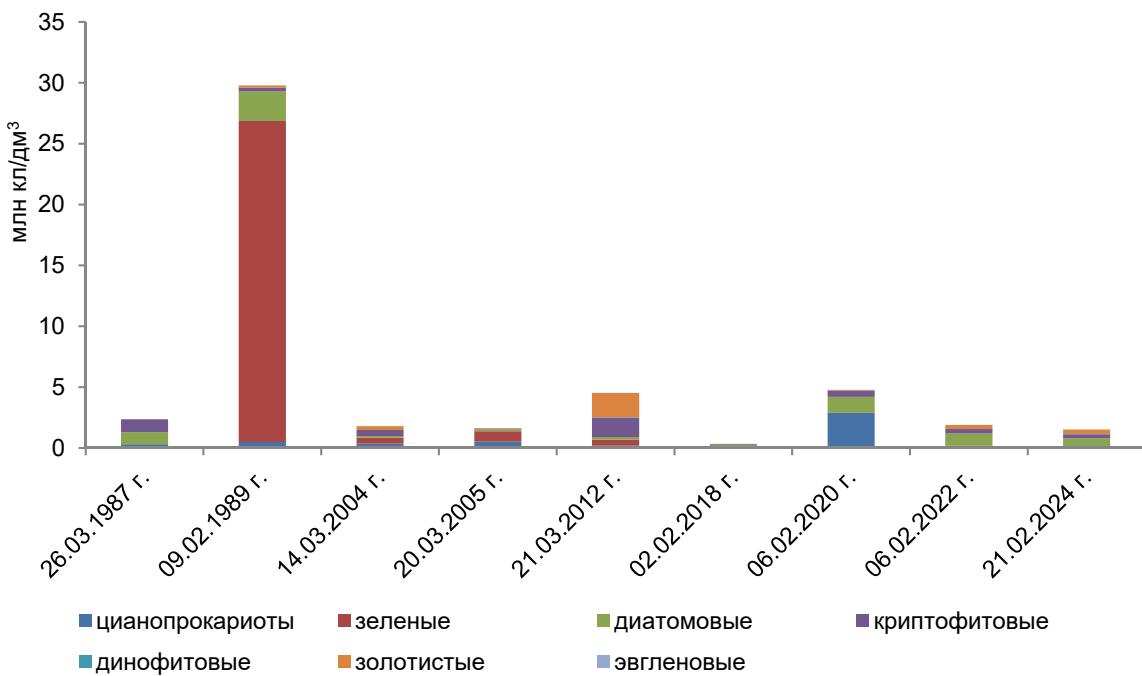


Рис. 6. Средняя численность пелагического фитопланктона в зимний период, млн кл/дм<sup>3</sup>

Fig. 6. Average abundance of pelagic phytoplankton in winter, million cells/dm<sup>3</sup>

Средняя биомасса, за редким исключением, не превышала 5 г/дм<sup>3</sup> (рис. 7). Ее многолетняя динамика практически совпадает с динамикой численности. С 2018 г. все большее значение в формировании биомассы приобретают диатомовые водоросли. Их вклад в общий показатель достигает 31–93 %, что в среднем составляет 62 %. В отдельные годы возрастает биомасса криптомонад. В последние 20 лет удельный вес представителей данного отдела составляет 17–75 %, в среднем – 36 %.

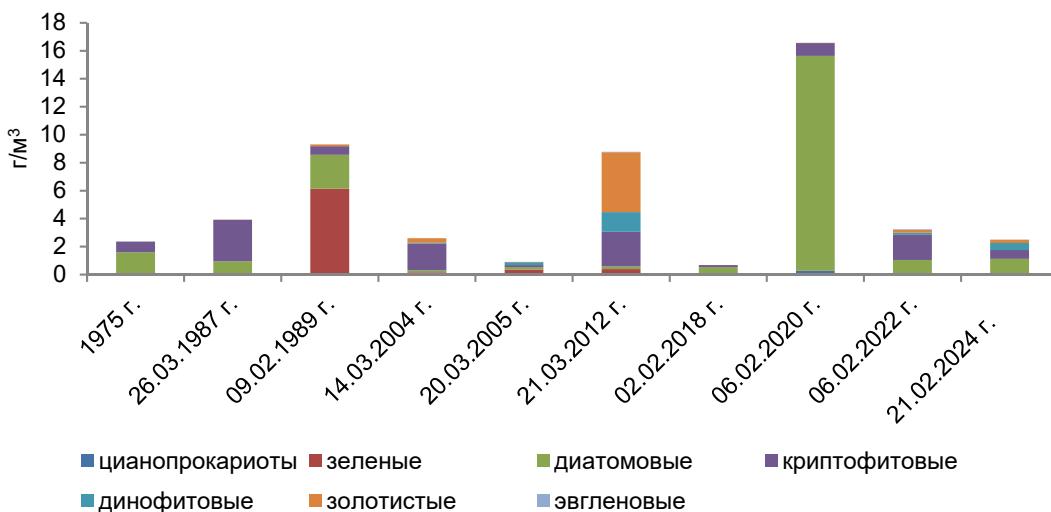


Рис. 7. Средняя биомасса пелагического фитопланктона в зимний период, г/дм<sup>3</sup>

Fig. 7. Average biomass of pelagic phytoplankton in winter, g/dm<sup>3</sup>

Таким образом, многолетние исследования зимнего фитопланктона водоема-охладителя свидетельствуют об относительном постоянстве структуры сообщества и его доминирующего комплекса. Вспышки развития водорослей в отдельные годы в значительной степени обусловлены погодными условиями.

Исследование зимнего зоопланктона проводили одновременно с фитопланктом. Подледный планктон в феврале обычно беден в таксономическом плане и слабо развит количественно. В основном он сформирован холодолюбивым комплексом коловраток и веслоногих ракообразных. Ветвистоусые ракообразные в большинстве случаев развиваются летом, а на зиму выпадают из планктона.

После формирования ледостава в течение зимнего периода обычно идет постепенное повышение температуры воды, которое к концу ледостава инициирует развитие планкtonных организмов. В марте возрастают видовое разнообразие, обилие и биомасса за счет интенсификации развития веслоногих и коловраток.

В зоопланктоне оз. Лукомское по многолетним собственным данным за летний период на пелагических и литоральных станциях встречается 46 видов, из них 23 коловраток, 7 копепод и 16 кладоцер. За все время наблюдений зимой зарегистрирована только половина – 23 вида: 9 таксонов видового ранга *Rotifera* и по 7 таксонов *Copepoda* и *Cladocera*.

В некоторые годы наблюдений (2020 и 2022) в февральском планктоне отмечается слабое, вплоть до полного отсутствия, развитие коловраток (рис. 8). В марте 2004 г., как и в марте 2012 г., эта группа достигла наибольшего разнообразия и обилия. Отсутствие или малое развитие в планктоне коловраток в феврале, а затем рост количественных показателей в марте могли произойти по нескольким причинам. Во-первых – это зимний подледный минимум развития этой группы. Во-вторых, возможны миграции ротифер, обусловленные изменением условий обитания как в разные месяцы, так и в разные годы наблюдений (температура, содержание кислорода, время и продолжительность ледостава и т. п.).

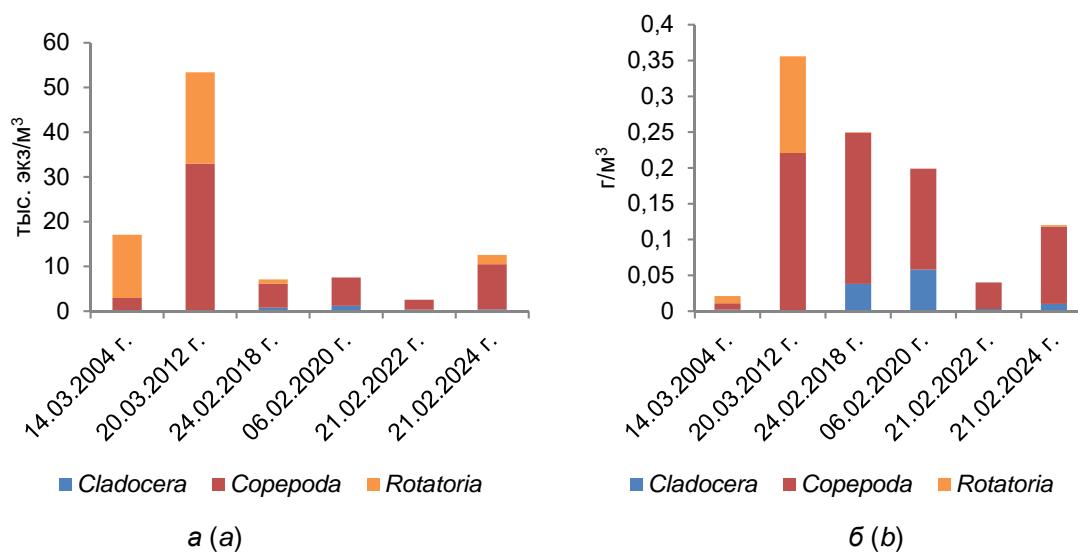


Рис. 8. Многолетняя динамика численности (а) и биомассы (б) подледного зоопланктона озера Лукомское

Fig. 8. Long-term dynamics of abundance (a) and biomass (b) of subglacial zooplankton in Lake Lukomskoe

В начальные годы наблюдений в зимний период коловратки были представлены круглогодичными холодолюбивыми или эвртермными пелагическими видами: *Keratella cochlearis* (Lauterborn, 1898), *Keratella quadrata* (O. F. Müller, 1786), *Polyarthra euryptera* Wierzejski, 1891, *Synchaeta* sp., *Ascomorpha ecaudis* Perty, 1850 и *Brachionus angularis* Gosse, 1851. *B. angularis* является индикатором органического загрязнения и обычно развивается в массе летом при высокой температуре воды. Учитывая это обстоятельство, рост его численности в это время обусловлен заносом течением из подогретой зоны. Впоследствии этот вид не регистрировался, что может свидетельствовать о стабилизации экосистемы озера и возможном снижении уровня трофии. Также в зимнем планктоне в последние годы не встречается *Ascomorpha ecaudis*.

В последнее десятилетие в планктоне зарегистрировано несколько ранее не указанных видов коловраток: *Polyarthra dolichoptera dolichoptera* (Idelson, 1925), *Asplanchna priodonta priodonta* (Gosse, 1850), *Filinia terminalis* (Plate, 1886), *Notholca squamula squamula* (Müller, 1786) и *Synchaeta pectinata*

(Ehrenberg, 1832). Из перечисленного списка только *Notholca squamula* – холодолюбивый, приуроченный к зимнему времени вид, остальные являются круглогодичными обычными обитателями пелагического зоопланктона, и отсутствие которых в планктоне ранее могло быть результатом их низкой численности и межгодовых особенностей формирования зимнего сообщества.

Максимальную плотность в ранние годы исследований имела *K. cochlearis* (5,05 тыс. экз/м<sup>3</sup> в 2004 г. и 13,6 тыс. экз/м<sup>3</sup> в 2012 г.). Численность остальных коловраток укладывалась в пределы 0,2–4,7 тыс. экз/м<sup>3</sup>. В указанный период коловратки составляли 38–82 % всей численности. В марте 2004 г. относительная численность коловраток доходила до максимальных 94 % при доминировании *B. angularis* (51 тыс. экз/м<sup>3</sup>). В 2018 г. подо льдом встречалась уже только *Synchaeta* sp., доля которой в общей численности составила 14 %. С 2020 по 2022 г. коловратки практически отсутствовали в составе зимнего сообщества. В 2024 г. *Rotifera* вновь стали фиксироваться в февральском планктоне, возросло их разнообразие. По-прежнему доминируют *Keratella cochlearis*, а также *Synchaeta pectinata*; их средняя численность составляет 0,75 и 0,60 тыс. экз/м<sup>3</sup> соответственно. На долю коловраток приходится 16 % общей численности и 1,6 % биомассы сообщества. Таким образом, согласно многолетним данным, по группе коловраток наблюдается относительная стабильность экосистемы озера.

В раковом планктоне, как и зоопланктоне в целом, господствуют различные возрастные стадии развития веслоногих; их относительная численность находилась в пределах 62 % (2012 г.) – 87 % (2022 г.). Соотношение циклопид и диаптомид варьировало в разные годы; чаще преобладали циклопиды, в основном их наутилальные и копеподитные стадии. Личинки циклопов за период исследований в среднем составляли 56 % численности веслоногих, что свидетельствует об активном состоянии и размножении циклопов в подледный период. В 2024 г. численность циклопид достигла максимального значения (10,05 тыс. экз/м<sup>3</sup>) за весь период исследований. Они составляют 99,5 % всей численности веслоногих, в том числе 80 % приходится на неполовозрелые стадии.

До начала 2000-х годов единственным представителем циклопов в зимнем планктоне был *Cyclops strenuus* (Fischer, 1851). В марте 2004 г. он формировал 62 и 31 % общей численности и биомассы копепод соответственно. В последующие годы данный вид отсутствовал. Учитывая сложности в определении видового статуса в роде *Cyclops*, необходимо считать ранее определенный как *C. strenuus* ныне указываемый для озера *Cyclops kolensis* (Lilljeborg, 1901). Несмотря на многочисленные указания для самых разных водоемов *C. strenuus* все же больше привержен к обитанию во временных водоемах, прудах и является представителем тепловодного комплекса [20, 21]. Что касается *C. kolensis*, то это холодолюбивый вид, переживающий лето в придонных слоях воды или в пелагене в состоянии диапаузы, а зимой и ранней весной он активен и размножается сразу после таяния льда. Доля этого вида в планктоне ранее и сейчас в отдельные годы высокая, и логично, что исходя из жизненного цикла, она возрастает к концу февраля – марта за счет активности размножающихся особей.

В прибрежной зоне в небольшом количестве обитает *Cyclops vicinus* (Ulyanin, 1875), обычно появляющийся в весенний период. Кроме указанных видов впервые в водоеме обнаружен *Diacyclops bicuspidatus* (Claus, 1857). Указанный вид широко распространен в мелких пересыхающих водоемах, в литорали озер и является типичным весенним видом [22].

В середине марта 2012 г., при наиболее высокой для данного периода температуре воды – 4,5–4,9 °C, зафиксированы взрослые *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863), в сумме насчитывающие 1,72 тыс. экз/м<sup>3</sup>. С 2020 г. эти виды в зимнем планктоне не встречались. Это теплолюбивые формы южного происхождения, в летнее время обитающие в хорошо прогреваемом эпилимнионе димитических озер Беларуси [23]. Некоторая часть многочисленной популяции, сформировавшейся летом, перезимовывает во взрослом состоянии. Поэтому они являются редкими обитателями подледного планктона.

Постоянный и единственный представитель диаптомид *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg, 1888) встречается в водоеме-охладителе круглогодично, в том числе и в подледном планктоне. Считается, что диаптомиды могут размножаться как летом, так и зимой. Зимний максимум у близкого и достаточно распространенного вида *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863) наблюдался в марте – апреле [24–26]. Для эврибионтного *Eudiaptomus graciloides*, встречающегося в оз. Лукомское, все же характерна приуроченность к прогреваемому эпилимниону, а размножение – к поздней весне. Хотя ранее в подледном планктоне водоема количество взрослых особей было выше численности личиночных стадий и составляло 63–92 %, а в последние годы относительная численность варьировала от 0,3 до 30 %, очевидно, что это свидетельствует о наличии в планктоне зимой половозрелых особей осенней генерации, которые после вскрытия водоема и прогревания воды приступят к размножению весной. Колебание их численности и доля в подледном планктоне не показательны и в большинстве случаев зависят от особенностей развития в летний период и численности осенью.

Поэтому значительное влияние на состав и развитие популяций веслоногих зимой оказывают, прежде всего, развитие представителей этой группы летом, жизненный цикл, условия ледостава, температура воды и кислородный режим. В связи с этим возникают сложности с интерпретацией динамики их популяций, особенно в зимнее время. Исключением могут быть популяция *Cyclops kolensis*, развитие и размножение которой проходит в холодное время года.

Ветвистоусые в основном развиваются летом, в подледных условиях не отличаясь разнообразием и высокой численностью. В последние два десятилетия постоянным и наиболее многочисленным представителем ветвистоусых пелагиали была *Daphnia longispina* (O. F. Müller, 1785), обилие которой варьировало в пределах 0,02 тыс. экз./м<sup>3</sup> (2012 г.) – 1,2 тыс. экз./м<sup>3</sup> (2020 г.). Ранее отмеченные здесь *Daphnia cucullata* (Sars, 1862) и *Daphnia cristata* (Sars, 1862) сейчас не встречаются. Из рода *Bosmina* регистрируемые летом *B. obtusirostris* (Sars, 1862), *B. longirostris* (O. F. Müller, 1785) и *B. crassicornis* (P. E. Müller, 1867) в зимнее время выпадают из планктона, за исключением *B. longirostris*, которая встречается единично. Для этого вида босмин диапазон условий обитания очень широк. Нами неоднократно в летнее время регистрировались их скопления как в прогреваемом прибрежье, так и у дна дициклических озер при низкой температуре (5–6 °C) [23]. Другие найденные зимой виды, например, *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller, 1785), встречаются в отдельные годы спорадически, поэтому динамику их численности зимой проследить не удается.

Наряду с низким таксономическим разнообразием, для подледного зоопланктона характерен и слабый уровень количественного развития. Средняя численность в пелагиали замерзающей части водоема постепенно снижалась: от 17,05 тыс. экз./м<sup>3</sup> (2004 г.) до 2,53 тыс. экз./м<sup>3</sup> (2022 г.); биомасса укладывалась в пределы 0,021 г/м<sup>3</sup> (2004 г.) – 0,25 г/м<sup>3</sup> (2018 г.). Исключение составил март 2012 г., когда в условиях наиболее высокой для данного периода температуры воды обилие и биомасса зоопланктона были максимально высокими и достигали 53,38 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,36 г/м<sup>3</sup> соответственно. Более высокие значения обилия и биомассы зоопланктона на момент последнего исследования 2024 г. укладываются в пределы многолетних колебаний (см. рис. 8).

В многолетнем аспекте отмечено снижение роли коловраток в сообществе. Если в начале 2000-х годов их доля в общей численности достигала 78 %, а в 2018 г. – 14 %, то с 2020 г. обнаруживаются единичные особи. Основу сообщества формируют копеподы, относительная численность и биомасса которых неуклонно возрастают: от 17 до 87 % и от 43 до 93 % соответственно. Указанные особенности динамики численности свидетельствуют о некотором снижении количества зоопланктона в этом озере.

В целом, видовой состав и структура сообщества в настоящее время типичны для зимнего периода и соответствуют водоемам с низкой трофностью. Хотя по зимнему планктону сложно оценить как трофический статус водоема, так и тенденции его изменения, следует отметить, что сокращение общей численности за счет коловраток и рост биомассы, в значительной степени формируемой крупными ракообразными, свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема-охладителя.

**Заключение.** Таким образом, в ионной структуре отмечено, что наиболее высокой скоростью поступления и накопления в водной массе водоема характеризуются гидрокарбонаты, а также ионы магния, натрия и хлора, при относительном снижении содержания сульфатов и кальция. Среди биогенных элементов наиболее устойчивый рост демонстрирует концентрация фосфора фосфатного, а снижение – концентрация нитрит-иона.

Многолетние исследования зимнего фитопланктона оз. Лукомское свидетельствуют об относительном постоянстве структуры сообщества и его доминирующего комплекса. Вспышки развития водорослей в отдельные годы в значительной степени обусловлены погодными условиями.

Видовой состав и структура сообщества зоопланктона озера в настоящее время типичны для зимнего периода. Хотя по зимнему планктону сложно оценить как трофический статус водоема, так и тенденции его изменения, следует отметить, что сокращение общей численности за счет коловраток и рост биомассы, в значительной степени формируемой крупными ракообразными, свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема-охладителя.

Несмотря на общие тенденции к снижению антропогенной нагрузки на экосистему озера после ввода в эксплуатацию парогенераторной установки, необходимы природоохранные мероприятия, направленные на улучшение экологического состояния оз. Лукомское. Так, реальная фосфорная нагрузка на экосистему озера превышает расчетную допустимую в 2 раза и примерно равна критической. Поэтому необходимо проведение водоохранных мероприятий на водосборе, особенно в отношении объектов животноводства, которые являются основными источниками поступления фосфора.

**Благодарности.** Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Б23МС-001), филиала «Лукомльская ГРЭС» РУП «Витебскэнерго» (проекты 65993, 6549А), а также в рамках научно-исследовательских работ 1.05 «Выявить закономерности развития озерных бассейнов Беларуси с использованием геоинформационного моделирования и разработать меры по их адаптации к изменению природной среды и антропогенному воздействию» и 1.11 «Изучение особенностей накопления и распределения газов в воде и донных отложениях разнотипных озер Беларуси и их роль в формировании экологического состояния водоемов» государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда».

**Acknowledgements.** The research is funded by the Belarusian Republican Fund for Fundamental Research (project Б23МС-001), the Lukoml SDPP, branch of RUE Vitebskenergo (projects 65993, 6549A), and within the framework of project 1.05 "To identify patterns of development of lake basins in Belarus using geoinformation modeling and to develop measures for their adaptation to changes in the natural environment and anthropogenic impact" and 1.11 "Study of the features of accumulation and distribution of gases in water and bottom sediments of different types of lakes in Belarus and their role in the formation of the ecological state of water bodies" of the State Program of Scientific Research "Natural Resources and Environment".

#### Список использованных источников

1. Озёра Беларуси : справочник / Б. П. Власов [и др.]. – Минск : Изд-во БГУ, 2004. – 284 с.
2. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Минск, 1974–2021.
3. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л. : Гидрометеоиздат, 1983. – 239 с.
4. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Фитопланктон и его продукция. – Л., 1981. – 31 с.
5. Винберг, Г. Г. Методы определения продукции водных животных / Г. Г. Винберг. – Минск : Вышэйшая школа, 1968. – 248 с.
6. Балушкина, Е. В. Зависимость между длиной и массой тела планктона ракообразных / Е. В. Балушкина, Г. Г. Винберг // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер : сборник. – Л. : ЗИН АН СССР, 1979. – С. 59–79.
7. Алекин, О. А. Основы гидрохимии / О. А. Алекин. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 440 с.
8. Продуктивность и перспективы использования экосистемы озера Лукомское – водоема-охладителя ТЭС / В. П. Ляхнович [и др.] // Экология. – 1987. – № 5. – С. 43–48.
9. Самойленко, В. М. Многолетние изменения фитопланктона водоема-охладителя / В. М. Самойленко, А. А. Свирид // Альгология. – 2014. – Т. 24, № 3. – С. 371–375.
10. Экосистема водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС / П. А. Митрахович [и др.] ; Белорусский государственный университет. – Минск : Право и экономика, 2008. – 144 с.
11. Боровик, Е. А. Озера Белорусской ССР (ротапринт) / Е. А. Боровик. – Минск, 1964. – 380 с.
12. Власов, Б. П. Влияние тепловой электростанции на экосистему водоема-охладителя Лукомское / Б. П. Власов, В. М. Самойленко // География: развитие науки и образования : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. «LXXIV Герценовские чтения», Санкт-Петербург, 21–23 апр. 2021 г. ; отв. редакц.: С. И. Богданов, Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. – СПб. : Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2021. – Т. 2. – С. 31–35.
13. Вежновец, Г. Г. Фитопланктон оз. Лукомского – охладителя ТЭС / Г. Г. Вежновец, В. М. Самойленко // Вестн. Белорус. гос. ун-та. – Сер. 2, Химия, биология, география. – 1995. – № 3. – С. 56–59.
14. Шкундина, Ф. Б. Сезонная динамика фитопланктона в некоторых озерах мира / Ф. Б. Шкундина // Гидробиологический журнал. – 1983. – Т. XIX, № 6. – С. 3–8.
15. Munawar, M. Phytoplankton Lake Superior 1973 / M. Munawar, I. Munawar // J. Great Lakes Res. – 1978. – № 4. – P. 415–442.
16. Roberts, E. C. Mixotrophic cryptophytes and their predators in the Dry Valley lakes of Antarctica / E. C. Roberts, J. Laybourn-Parry // Freshwater Biology. – 1999. – Vol. 43. – P. 737–746.
17. Danilov, R. A. Phytoplankton communities at different depths in two eutrophic and two oligotrophic temperate lakes at higher latitude during the period of ice cover / R. A. Danilov, N. G. A. Ekelund // Acta Protozool. – 2001. – Vol. 40. – P. 197–201.
18. Seasonal dynamics of phytoplankton and planktonic protozoan communities in a Northern temperate humic lake: diversity in a dinoflagellate dominated system / J. M. Graham [et al.] // Microbial Ecology. – 2004. – Vol. 48, № 4. – P. 528–540. doi:10.1007/s00248-004-0223-3
19. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мястро, Баторино (2009 год). – Минск : Изд-во БГУ, 2010. – 86 с.
20. Вежновец, В. В. Ракообразные (Cladocera, Copepoda) в водных экосистемах Беларуси. Каталог. Определительные таблицы / В. В. Вежновец. – Минск : Беларуская навука, 2005. – 150 с.
21. Монченко, В. И. Челюстноротые циклообразные. Циклопы (Cyclopidae) / В. И. Монченко // Фауна Украины. – Киев : Наукова думка, 1974. – Т. 27, вып. 3. – 452 с.
22. Diacyclops bicuspidatus Claus, 1857 (диациклоп длиннохвостый) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://crustacea-g2n.mozello.com/copepoda/diacyclops-bicuspidatus/>. – Дата доступа: 06.06.2024.
23. Вежновец, В. В. Вертикальная структура зоопланктона в стратифицированных озерах Беларуси с разной степенью трофии / В. В. Вежновец, М. Д. Журавлев // Биология внутренних вод. – 2022. – № 6. – С. 725–733. doi:10.31857/S0320965222060195
24. Структура и функционирование пресноводных экосистем. – Л. : Наука, 1988. – 280 с.
25. Ривьер, И. К. Особенности функционирования зоопланктона сообществ водоемов различных типов / И. К. Ривьер // Структура и функционирование пресноводных экосистем. – Л. : Наука, 1988. – С. 80–112.
26. Ривьер, И. К. Холодноводный зоопланктон озер бассейна Верхней Волги / И. К. Ривьер ; отв. ред. В. Н. Яковлев ; Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина РАН. – Ижевск : Изд. Пермяков С. А., 2012. – 390 с.

### References

1. Vlasov B. P., e. a. *Ozyora Belarusi: spravochnik* [Lakes of Belarus. Handbook]. Minsk, 2004, 284 p. (in Russian)
2. *Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi* [State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of surface waters of land]. Minsk, 1964–2023. (in Russian)
3. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij.* [Guide to methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 239 p. (in Russian)
4. *Metodicheskie rekomendacii po sboru i obrabotke materialov pri gidrobiologicheskikh issledovaniyah na presnovodnyh vodoemah. Fitoplankton i ego produkciya* [Methodological recommendations for collecting and processing materials during hydrobiological studies in freshwater bodies. Phytoplankton and its products]. Leningrad, 1981, 31 p. (in Russian)
5. Vinberg G. G. *Metody opredeleniya produkciyi vodnyh zhivotnyh* [Methods for determining aquatic animal production] / Minsk, Vyshejschaya Shkola Publ., 1968, 248 p. (in Russian)
6. Balushkina E. V., Vinberg G. G. *Zavisimosti mezhdu dlinoj i massoj tela planktonnyh rakoobraznyh*. Sbornik Eksperimental'nye i polevye issledovaniya biologicheskikh osnov produktivnosti ozer [Collection of Experimental and field studies of the biological basis of lake productivity]. Leningrad, Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences Publ., 1979, pp. 59–79. (in Russian)
7. Alekin O. A. *Osnovy gidrohimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970, 440 p. (in Russian)
8. Lyahnovich V. P., Karataev A. Yu., Mitrahovich P. A., Gur'yanova L. V., Vezhnovec G. G. *Produktivnost' i perspektivy ispol'zovaniya ekosistemy ozera Lukomskoe – vodoema-ohladitelya TES* [Productivity and prospects for using the ecosystem of Lake Lukomskoye – the cooling reservoir of the thermal power plant]. *Ecology*, 1987, no. 5, pp. 43–48. (in Russian)
9. Samoilenco V. M., Svirid A. A. *Mnogoletnie izmeneniya fitoplanktona vodoema-ohladitelya* [Long-term changes in the phytoplankton of the cooling pond]. *Algology*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 371–375. (in Russian)
10. Mitrahovich P. A., e. a. *Ekosistema vodoema-ohladitelya Lukom'skoj GRES* [Ecosystem of the cooling pond at Lukomlskaya GRES]. Minsk, Pravo i Economika Publ., 2008, 144 p. (in Russian)
11. Borovik E. A. *Ozera Belorusskoj SSSR (rotaprint)* [Lakes of the Belarusian USSR (rotaprint)]. Minsk, 1964, p. 380. (in Russian)
12. Vlasov B. P., Samoilenco V. M. *Vliyanie teplovoj elektrostancii na ekosistemu vodoema-ohladitelya Lukomskoe* [The influence of a thermal power plant on the ecosystem of the Lukomskoye cooling pond]. Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya. Sbornik statej po materialam ezhegodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "LXXIV Gercenovskie chteniya" [Proc. Int. sci. and practical conf. "LXXIV Herzen ReadingGeography": development of science and education]. Saint Petersburg, 2021, pp. 31–35. (in Russian)
13. Vezhnovec G. G., Samoilenco V. M. *Fitoplankton oz. Lukomskogo – ohladitelya TES* [Phytoplankton of the lake Lukomsky – thermal power plant cooler]. *J. of the Belarusian State University Series 2. Chemistry. Biology. Geography*, 1995, no. 3. Minsk, 1995, pp. 56–59. (in Russian)
14. Shkundina F. B. *Sezonnaya dinamika fitoplanktona v nekotoryh ozerah mira* [Seasonal dynamics of phytoplankton in some lakes of the world]. *Hydrobiology* J., 1983, no. 6, pp. 3–8. (in Russian)
15. Munawar M., Munawar I. Phytoplankton Lake Superior 1973. *J. Great Lakes Res.*, 1978, no. 4, pp. 415–442.
16. Roberts E. C., Laybourn-Parry J. Mixotrophic cryptophytes and their predators in the Dry Valley lakes of Antarctica. *Freshwater Biology*, 1999, no. 43, pp. 737–746.
17. Danilov R. A., Ekelund N. G. A. Phytoplankton communities at different depths in two eutrophic and two oligotrophic temperate lakes at higher latitude during the period of ice cover. *Acta Protozool.*, 2001. vol. 40, pp. 197–201.
18. Graham J. M., e. a. Seasonal dynamics of phytoplankton and planktonic protozoan communities in a Northern temperate humic lake: diversity in a dinoflagellate dominated system. *Microbial Ecology*, 2004, vol. 48, no. 4, pp. 528–540. doi:10.1007/s00248-004-0223-3
19. *Byulleten' ekologicheskogo sostoyaniya ozer Naroch'*, Myastro, Batorino [Bulletin of the ecological state of lakes Naroch, Myastro, Batorino]. Minsk, 2010, 86 p. (in Russian)
20. Vezhnovec V. V. *Rakoobraznye (Sladocera, Copepoda) v vodnyh ekosistemah Belarusi. Katalog. Opredelitel'nye tablitsy* [Crustaceans (Cladocera, Copepoda) in aquatic ecosystems of Belarus. Catalog. Definitive tables]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2005, 150 p. (in Russian)
21. Monchenko V. I. *Chelyustnorote cikloobraznye. Ciklopy (Cyclopidae)* [Cyclostomes. Cyclops (Cyclopidae)]. Fauna Ukrayny, 1974, no. 3. Kiev, Naukova dumka Publ., 452 p. (in Russian)
22. Diacyclops bicuspidatus Claus, 1857. Available at: <https://crustacea-g2n.mozello.com/copepoda/diacyclops-bicuspidatus/> (accessed 06 June 2024). (in Russian)
23. Vezhnovec V. V., Zhuravlev M. D. *Vertikal'naya struktura zooplanktona v stratificirovannyh ozerah Belarusi s raznoj stepen'yu trofii* [Vertical structure of zooplankton in stratified lakes of Belarus with different degrees of trophy]. *Biologiya vnutrennih vod*, 2022, no. 6, pp. 725–733. doi:10.31857/S0320965222060195 (in Russian)
24. *Struktura i funkcionirovanie presnovodnyh ekosistem* [Structure and functioning of freshwater ecosystems]. Leningrad, Nauka Publ., 1988, 280 p. (in Russian)
25. Riv'er I. K. *Osobennosti funkcionirovaniya zooplanktonnyh soobshchestv vodoemov razlichnyh tipov. Struktura i funkcionirovanie presnovodnyh ekosistem* [Features of the functioning of zooplankton communities of various types of water bodies. Structure and functioning of freshwater ecosystems]. Nauka Publ., 1988, pp. 80–112. (in Russian)
26. Riv'er I. K. *Holodnovodnyj zooplankton ozer bassejna Verhnej Volgi* [Cold-water zooplankton of lakes of the Upper Volga basin]. Izhevsk, 2012, 390 p. (in Russian)

### Информация об авторах

*Суховило Нина Юрьевна* – кандидат географических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией озероведения, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

*Самойленко Вера Михайловна* – старший научный сотрудник, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь)

*Вежновец Василий Васильевич* – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ГНПО «НПЦ НАН Беларусь по биоресурсам» (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь). E-mail: vezhn47@mail.ru

### Information about the authors

*Nina Yu. Sukhovilo* – Ph. D. (Geography), Head of the Laboratory of Lake Research, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

*Vera M. Samoilanka* – Senior Researcher, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus)

*Vasil V. Vezhnavets* – Ph. D. (Biology), Leading Researcher, State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Akademicheskaya Str., 27, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: vezhn47@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-61-69>

УДК 504.056+502.316+504.056

Поступила в редакцию 04.11.2024

Received 04.11.2024

## ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ РЫБАЛКА КАК ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ И ВОДОТОКОВ ПЛАСТИКОМ

Т. И. Кухарчик, А. А. Мелешко, М. Л. Синицкая

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности загрязнения прибрежных зон водоемов и водотоков отходами пластика в местах любительской рыбалки. Полевые исследования выполнены в летний период 2023 и 2024 г. на водохранилищах Чижовское, Дрозды, Цнянское, Слепянской водной системе, реке Свислочь (г. Минск), озерах Жлобинское, Светиловичское и озере без названия (г. Барановичи). Для оценки количества отходов пластика использованы два метода исследований: маршрутный метод и метод площадок.

Показано, что отходы пластика обнаруживаются на всех объектах при вариабельности от 0,03 до 13,3 шт/м<sup>2</sup>. Наибольшее количество отходов выявлено на участках, где проводится обустройство мест рыбалки с использованием пенопластика, полиэтилена и других полимерных материалов. Установлено, что отходы пластика в местах рыбалки представлены отходами бытового назначения (66 % общего их количества), рыболовными принадлежностями (19 %) и табачными изделиями (15 %). Основное количество отходов пластика (73 % случаев) встречается на берегу непосредственно в месте рыбалки или вблизи от этого места, примерно 27% – в воде. Рассмотрено соотношение отходов пластика по размерам. Показано, что на большинстве объектов преобладают фрагментированные отходы. Обсуждена необходимость выявления факторов аккумуляции отходов пластика и их перераспределения.

**Ключевые слова:** отходы пластика; прибрежная зона; любительская рыбалка; типы полимеров.

**Для цитирования.** Кухарчик Т. И., Мелешко А. А., Синицкая М. Л. Любительская рыбалка как источник загрязнения прибрежных зон пресноводных водоемов и водотоков пластиком // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 61–69.

## RECREATIONAL FISHING AS A SOURCE OF POLLUTION OF COASTAL ZONES OF FRESHWATER RESERVOIRS AND WATERCOURSES WITH PLASTIC

Т. И. Кухарчик, А. А. Мелешко, М. Л. Синицкая

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

**Abstract.** The article discusses the features of pollution of coastal areas of reservoirs and watercourses with plastic waste in places of recreational fishing. Field studies were carried out in the summer of 2023 and 2024 at the reservoirs. Chizhovskoye, Drozdy, Tsnyanskoye, Slepanskaya water system and the Svisloch river (Minsk) and Lake Zhlobinskoye, Svetilovichskoye and Lake untitled (Baranovichi). Two research methods were used to estimate the amount of plastic waste: the route method and the site method.

It is shown that plastic waste is found at all sites with a variability from 0.03 to 13.3 pcs/m<sup>2</sup>. The largest amount of waste was found in areas where fishing sites are being equipped using foam, polyethylene and other polymeric materials. It was found that plastic waste in fishing areas is represented by household waste (66 % of the total amount), fishing accessories (19 %) and tobacco products (15 %). The plastic waste (73% of cases) is found on the shore directly at the fishing spot or near this place, approximately 27% – in the water. The ratio of plastic waste by size is considered. The need to identify the factors of accumulation of plastic waste and their redistribution is discussed.

**Keywords:** plastic waste; coastal zone; amateur fishing; types of polymers.

**For citation.** Kukharchyk T. I., Meleshko A. A., Sinitskaya M. L. Recreational fishing as a source of pollution of coastal zones of freshwater reservoirs and watercourses with plastic. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 61–69.

**Введение.** Загрязнение пресноводных аквальных систем пластиком в последние годы признается одной из важных экологических проблем, заслуживающих более пристального внимания и изучения с точки зрения как уровней их загрязнения, так и выявления источников поступления пластика [1, 2]. В отличие от Мирового океана исследования озер и рек начаты недавно, при этом преимущественно с акцентом на их загрязнение микропластиком. Вместе с тем полученные за относительно короткий период данные свидетельствуют о важной транспортной роли водотоков в перемещении отходов пластика и микропластика с суши в океан [3, 4].

Отходы пластика зафиксированы на береговых линиях по всему миру [5–7], и получены доказательства их аккумуляции в прибрежной растительности, поймах, эстуариях и озерах, поскольку интенсивный вынос отходов и, соответственно, очищение аквальных систем происходит лишь при экстремальных гидрологических условиях – штормах, наводнениях и т. д. [1].

Согласно [8, 9], отходы пластика (или макропластик) еще недостаточно осознаны как источник загрязнения пресноводных систем, несмотря на явное их доминирование по весу и размеру. Негативное воздействие макропластика, задокументированное для морских видов живых организмов, может быть аналогичным и для пресноводных видов в случае их запутывания пластиком, использовании пластика для гнездований, проглатывания и т. д. Следствием замусоривания прибрежных зон является снижение их ландшафтной ценности и эстетической привлекательности, а также ухудшение санитарно-гигиенических условий.

Одним из источников загрязнения аквальных систем пластиком, как и другими отходами, является рыболовство. Выброшенные или потерянные рыболовные снасти или их фрагменты, ящики для рыбы, упаковка продукции, буи и другие предметы, изготовленные в основном из пластика, являются типичными отходами [10, 11]. По результатам обобщения всемирной базы данных по морскому мусору [12] в 2018 г. в толще воды примерно 22,9 % пластика было представлено рыболовными предметами, на пляжах – 8,3 % [13]. Появившийся термин «призрачная рыбалка», связанный с продолжающейся способностью выброшенных (или потерянных) рыболовных сетей ловить рыбу и морских животных, свидетельствует о важности учета данного вида воздействия.

Особый интерес с точки зрения воздействия на пресноводные аквальные системы представляет любительская рыбалка, определяемая как рыбалка для удовольствия, еды или спорта, а не для продажи. В Беларуси развитие любительской рыбалки обусловлено большим количеством рек, озер и искусственных водоемов, а также их разнообразием и хорошей доступностью. Наиболее распространенной формой любительской рыбалки является рыбалка, которая осуществляется с помощью крючковых видов снастей (удочки, спиннинга и др.). Можно предположить, что, как и для морских акваторий, рыбалка на пресноводных водоемах сопровождается образованием отходов и их поступлением в окружающую среду. Вместе с тем, в отличие от морских акваторий и их побережий, которым посвящено большое количество публикаций, пресноводные системы, включая прибрежные зоны, практически не исследованы.

В нашей стране изучение прибрежных зон аквальных систем начато недавно в Институте природопользования НАН Беларуси, и полученные результаты свидетельствуют об актуальности проблемы [14]. Цель данной работы – получить первые оценки загрязнения пластиком прибрежных зон водоемов и водотоков для территории Беларуси. В качестве потенциального источника загрязнения рассмотрена любительская рыбалка с использованием крючка и лески, осуществляемая с берега.

**Объекты и методы исследования.** Исследования проводили в летний сезон 2023 и 2024 г. в прибрежных зонах водохранилищ Чижовское, Дрозды, Цнянское, Слепянской водной системе (районе ул. Ф. Скорины), на участке реки Свислочь ниже водохранилища Дрозды (г. Минск) и на озерах Жлобинское, Светиловичское и озере без названия (г. Барановичи).

Выбирали участки, на которых имелись явные признаки присутствия рыбаков: расчищенные в тростниковых зарослях подступы к воде, места установки удочек и др. Следует отметить, что выбор места для рыбалки зависит в том числе от природных особенностей водоема/водотока, их береговой зоны, заболоченности, наличия растительности, зарастания и других факторов. Для ряда городских водоемов и водотоков характерна обустроенностъ их береговой зоны с бетонированием и (или) подсыпкой, что повышает их комфортность для рыбаков без необходимости дополнительной организации доступа к воде (при условии лова рыбы с берега). Однако большинство водоемов характеризуется наличием древесно-кустарниковой растительности на берегах и (или) тростниковых зарослей в прибрежной зоне. В таком случае места для рыбалки представляют собой расчищенные от растительности прибрежные участки шириной до 5–6 м. Типичная картина их расположения характерна для озера Жлобинское, где на дамбе по обеим ее сторонам насчитывается более двух десятков таких мест (рис. 1). Такие же места организованы по юго-восточному и восточному берегам озера.

В зависимости от природных особенностей береговой зоны использовали два метода учета отходов пластика: маршрутный метод и метод заложения площадок. Маршрутный метод применяли для оценки ситуации вдоль выбранной прибрежной зоны в случае расположения рыбаков практически в любом месте. Данный метод использовали при обследовании участков Слепянской водной системы, Цнянского водохранилища (г. Минск), озера Светиловичское (г. Барановичи). Длина маршрутов варьировалась от 190 до 2000 м. При маршрутном методе учитывали пластик, визуально диагностируемый по ходу движения, с примерной шириной охвата местности около 3 м. Данный метод, хотя и приводит к некоторой неопределенности данных из-за сложности выявления небольших отходов или их фрагментов [15], но тем не менее обеспечивает быструю оценку уровня загрязнения на больших участках [16].



**Рис. 1. Общий вид озера Жлобинское (а) и его юго-восточной части (б) с организованными местами для любительской рыбалки**

**Fig. 1. General view of Lake Zhlobinskoe (a) and its southeastern part (b) with organized places for recreational fishing**

Метод заложения площадок использовали для учета пластиковых отходов в местах размещения рыбаков и (или) при наличии признаков ведения рыбалки. Размеры площадок на участках любительской рыбалки варьировали от 2 м × 2 м до 5 м × 6 м, что определялось размерами зоны скошенного тростника для доступа к открытой воде (в том числе для лодок), наличием специальных сооружений для доступа к воде и другими факторами. Этот метод позволил более детально исследовать рыболовные места для обнаружения мелких рыболовных снастей, таких как приманки и лески, которые могли остаться незамеченными при использовании маршрутного метода.

Полевые исследования носили как разовый, так и неоднократный характер, что является необходимым для сбора информации и оценки динамики уровня загрязнения.

Учитывали отходы пластика с их дифференциацией по наименованию изделий, размеру и целостности. Особое внимание уделяли выделению отходов, связанных с рыболовной деятельностью, к которым помимо рыболовных снастей отнесены изолента, скотч, фрагменты пенопласта, контейнеры и посуда для прикорма и (или) хранения улова. Приняты следующие размеры отходов пластика: менее 1 см, 1–2 см, 2–5 см, 5–10 см и более 10 см. В последнюю категорию отходов попадали фрагменты полиэтиленовой пленки, полиэтиленовые пакеты, бутылки. Тип полимера определяли при камеральной обработке данных с учетом назначения изделий и применяемых для этого полимеров.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты исследования показали, что отходы пластика обнаруживаются повсеместно. Всего в ходе полевых работ зафиксировано около 6,5 тыс. отходов пластика. Их количество в местах рыбалки варьирует от 0,03 до 13,3 шт/м<sup>2</sup> (см. таблицу). Максимальное зафиксированное количество отходов характерно для локальных участков на южном берегу Чижовского водохранилища.

Обследованные водоемы и водотоки по количеству отходов пластика в порядке их убывания (в расчете на 1 м<sup>2</sup>) ранжируются следующим образом: водохранилище Чижовское > река Свислочь > озеро Жлобинское > озеро без названия > озеро Светиловичское > водохранилище Дрозды > Слепянская водная система > Цнянское водохранилище. Выявлено, что наибольшее количество отходов пластика обнаруживается в местах с заболоченными и (или) закустаренными берегами, которые использованы для организации места пребывания на берегу, например на берегу Чижовского водохранилища. Высокий уровень загрязнения места рыбалки на реке Свислочь ниже плотины обусловлен отсутствием проведения здесь работ по сенокошению и уборке. В целом недостаток соответствующей инфраструктуры, в первую очередь урн и контейнеров для мусора, способствует накоплению отходов. В ряде случаев отсутствует регулярная уборка территории. Можно предположить, что отходы на рыболовных местах остаются неубранными и по той причине, что культура поведения рыбаков из-за уединенности таких мест не регламентируется общественным мнением. На Слепянской водной системе часть бетонного ограждения оказалась нарушенной, в результате чего были созданы благоприятные условия для аккумуляции пластика.

Всего обнаружено 107 наименований отходов пластика. В большинстве случаев доминируют отходы бытового назначения, на долю которых приходится 66 % общего их количества с максимальными значениями до 97 %. В данную категорию отходов попадают одноразовая упаковка для еды и напитков (29 % случаев), полиэтиленовые пакеты для транспортировки различных принадлежностей (22), пластиковые крышки бутылок (15), фрагменты полиэтиленовой пленки (15 % случаев). Бутылки встречаются в 6,5 % случаев.

**Количество и структура отходов пластика в прибрежных зонах водоемов и водотоков  
в местах любительской рыбалки**

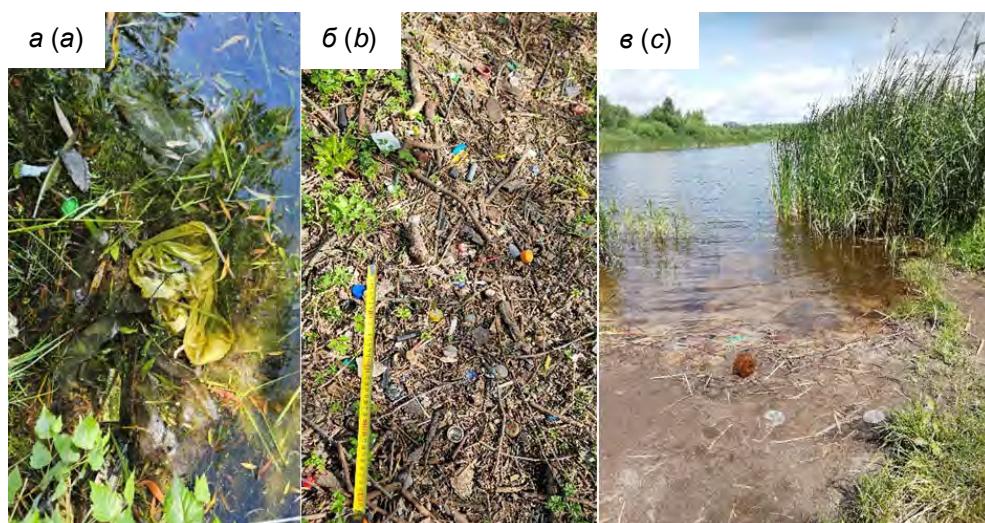
**Quantity and structure of plastic waste in coastal areas of reservoirs and watercourses  
in places of amateur fishing**

Водоем/водоток	Дата обследования	Обследованная площадь участка, м <sup>2</sup>	Всего отходов, шт/м <sup>2</sup>	Структура отходов пластика, %		
				бытовые отходы	рыболовные принадлежности	табачные изделия
Водохранилище Цнянское	15.06.2023	591	0,03	90,0	5,0	5,0
	29.09.2023	1470	0,05	43,6	32,1	24,4
	06.06.2024	1470	0,06	66,7	7,4	25,9
	10.09.2024	1470	0,08	27,9	8,1	64,0
Водохранилище Чижовское	31.05.2023	4	11,50	21,7	78,3	0,0
	11.04.2024	7,5	13,33	76,7	16,9	6,4
	26.06.2024	700	1,08	53,9	13,6	32,5
Водохранилище Дрозды	16.06.2023	60	0,32	89,5	0,0	10,5
Озеро Жлобинское	18.07.2023	126	1,87	69,9	4,2	25,8
Озеро без названия	18.07.2023	72	0,93	97,0	3,0	0,0
Озеро Светиловичское	18.07.2023	234	0,42	83,8	8,1	8,1
Река Свислочь	16.06.2023	14	2,79	61,5	23,1	15,4
Слепянская водная система	09–10.04.2024	5589	0,24	62,8	30,4	6,8
	30.04.2024	5589	0,14	74,2	18,5	7,3
	27.05.2024	5589	0,14	73,8	15,3	10,8
	07.06.2024	5589	0,18	67,0	18,7	14,3

Вклад отходов пластика, относящихся к рыболовным принадлежностям, в среднем оценивается в 19 %. Среди данной категории отходов встречаются фрагменты рыболовных сетей и лески, поплавки, куски пенополиуретана и монтажной пены, пенопласт, шпагат, лента оградительная, упаковка от прикорма, различные контейнеры или пластиковые стаканы и т. д. Максимальные зафиксированные значения достигают 78 % и характерны для рыболовного места на Чижовском водохранилище, где очевидно обустройство мест рыбаки с помощью подручных средств. Достаточно высокий вес рыболовных отходов (от 15 до 30 %) на Слепянской водной системе. В то же время на водохранилище Дрозды при обследовании двух участков рыболовных принадлежностей не обнаружено.

Третью значительную группу отходов в местах рыбаки образуют табачные изделия, представленные фильтрами от сигарет, упаковками от них и другими изделиями. На отдельных участках, например, на Цнянском водохранилище, доля табачных изделий достигает 64 %.

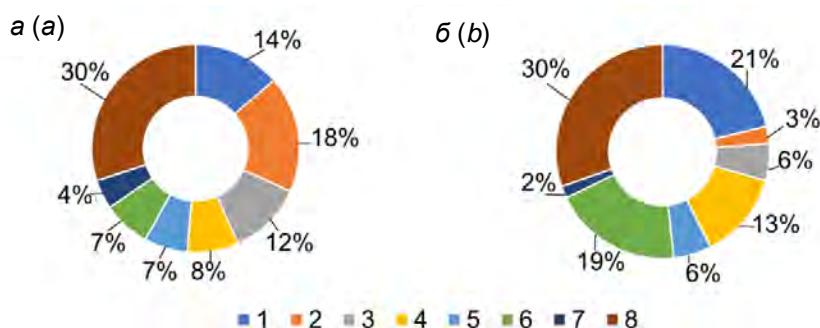
Примеры некоторых видов отходов пластмасс приведены на рис. 2.



**Рис. 2. Примеры отходов пластика на рыболовных местах: а – полиэтиленовый пакет; б – крышки, фильтры от сигарет и другие виды пластика; в – фрагмент бутылки и крышки от стаканов**

**Fig. 2. Examples of plastic waste in fishing grounds: a – a plastic bag; b – caps, cigarette filters and other types of plastic; c – a fragment of a bottle and a lid from glasses**

Отходы пластика встречаются на берегу непосредственно в месте рыбалки или вблизи от него (73 % случаев), а также в воде (27 % случаев). При этом если в отношении бытовых отходов и рыболовных принадлежностей это соотношение примерно одинаковое, то табачные изделия обнаруживаются преимущественно на берегу (95 % случаев). По количеству обнаруженных отходов на берегу доминируют фильтры от сигарет (18 % случаев), упаковка пищевая (14), полиэтиленовая пленка (11) и полиэтиленовые пакеты разного назначения (11 % случаев) (рис. 3). В структуре отходов в воде преобладают полиэтиленовые пакеты (23 % случаев), упаковка пищевая (21) и пенопласт (15 % случаев). Присутствие в воде различных видов отходов свидетельствует о ветровом перемещении отходов с берега, что особенно характерно для легких полиэтиленовых пакетов и упаковочных материалов.



**Рис. 3. Prozentное соотношение отходов пластика в местах любительской рыбалки, обнаруженных на берегу (а) и в воде (б):** 1 – упаковка пищевая; 2 – фильтры от сигарет; 3 – полиэтиленовая пленка; 4 – пенопласт; 5 – крышки от бутылок; 6 – полиэтиленовые пакеты; 7 – бой пластмассы; 8 – прочее

**Fig. 3. Percentage of plastic waste in recreational fishing sites found on the shore (a) and in the water (b):**  
1 – food packaging; 2 – cigarette filters; 3 – plastic film; 4 – foam; 5 – bottle caps; 6 – plastic bags;  
7 – plastic fragments; 8 – other

Следует отметить, что отходы пластика в воде фиксировали только с берега, что не всегда является достаточным с точки зрения оценки загрязнения. Это визуально диагностируемые отходы либо на мелководье (частично перекрытые песком) непосредственно в местах рыбалки, либо в прибрежной растительности рядом. Важность же их учета определяется потенциальной опасностью воздействия.

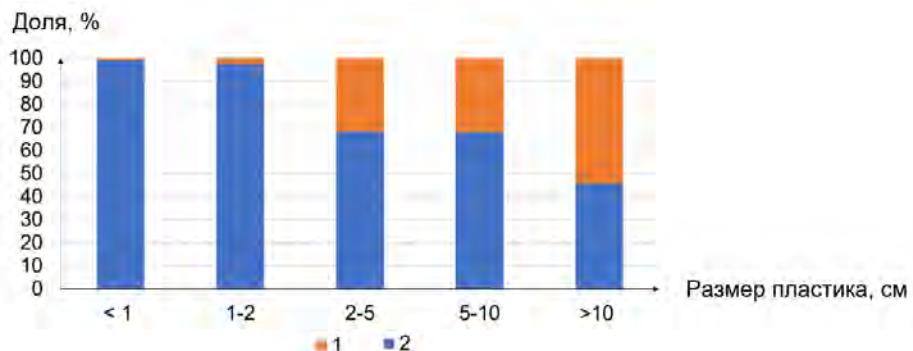
Разнообразие зафиксированных отходов пластика обусловлено также типами полимеров, из которых изготовлены изделия. Как в воде, так и на суше отходы пластика представлены различными полимерами, в том числе полиэтиленом (различные виды упаковок), полипропиленом (крышки бутылок, контейнеры), полистиролом (пенопласт), полиэтилентерефталатом (бутылки) и др.

Установлено, что отходы пластика в местах рыбалки представлены как целыми изделиями (бутылки, контейнеры, пакеты, стаканы, крышки, обертки), так и их фрагментами. На большинстве объектов фрагментированные отходы преобладают: в среднем на их долю приходится примерно 62 % общего количества отходов. Исключением является рыболовное место на реке Свислочь, где соотношение целых изделий и фрагментов примерно одинаково, а также на озере Светиловичское и озере без названия, где преобладают целые отходы (63 и 64 % соответственно).

Размеры обнаруженных отходов пластика варьируют от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Целые изделия, как правило, характеризуются значительными размерами. Это в первую очередь касается полиэтиленовых пакетов, размер которых достигает десятков сантиметров, а также бутылок, представленных диапазоном объемов от менее чем 0,5 до 2,0 л. В прибрежной зоне Цнянского водохранилища обнаружена емкость для воды объемом 5,0 л. Кроме того, встречаются такие отходы, как изолента, скотч, оградительные ленты, леска и прочие, которые имеют вытянутую форму значительной длины. Разнообразный состав крупных отходов по размерам подчеркивает их различие по потенциальному воздействию на окружающую среду. Загрязнение такими отходами может быть опасным из-за большой площади контакта с окружающей средой. Кроме того, как и другие полимерные материалы, они могут содержать различные химические вещества, включая пластиковые добавки или другие загрязнители, которые при контакте с водой, воздухом или почвой будут высвобождаться, создавая потенциальные риски для живых организмов и экосистем.

В целом анализ отходов по их величине показал, что при размере отходов более 10 см на долю целых отходов приходится 54 % их количества, при размере менее 1 см и 1–2 см – около 1 % (рис. 4). Практически все отходы размером менее 2 см представляют собой фрагменты (обрывки, обломки,

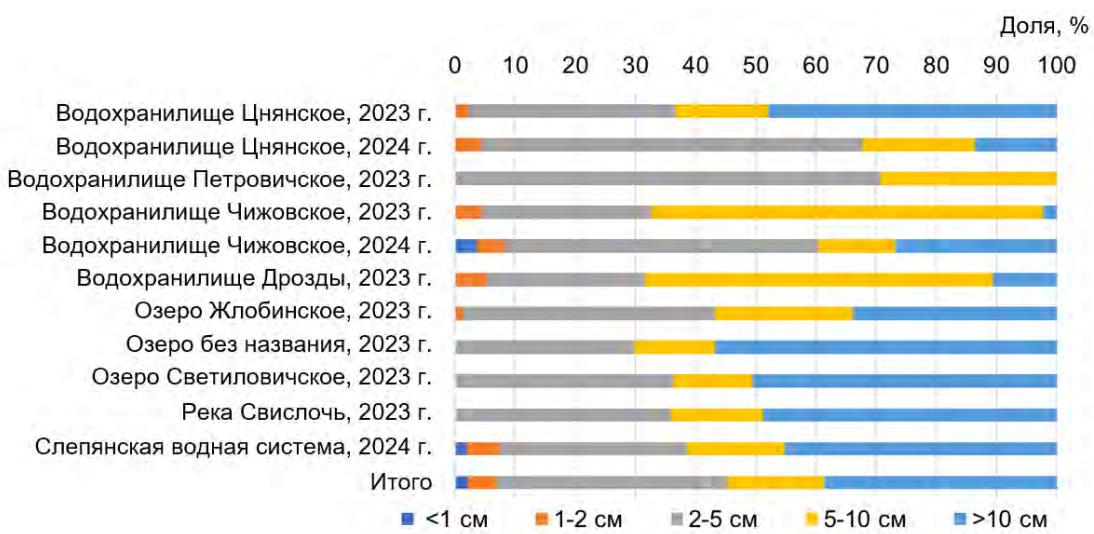
куски), что является следствием нарушения целостности изделий при их использовании либо разрушения уже после попадания в окружающую среду под воздействием природных и антропогенных факторов. Поскольку рыболовные места подвержены частым посещениям, оказавшиеся под ногами отходы разламываются и (или) деформируются. В свою очередь, любые повреждения целостности пластиковых изделий (трещины, выемки, хлопья, ямки и др.) повышают интенсивность химического выветривания [17]. Разрушение и фрагментация макропластика сопровождаются образованием частиц микропластика, которому в последние годы уделяется повышенное внимание из-за его опасности для живых организмов [1, 2].



**Рис. 4. Соотношение целых и фрагментированных отходов пластика на рыболовных местах в зависимости от размера**

**Fig. 4. The ratio of whole and fragmented plastic waste in fishing grounds, depending on the size**

На обследованных участках отсутствует четкая закономерность распределения отходов по их размерам (рис. 5). На Слепянской водной системе, озере Светиловичское, озере без названия) доминируют отходы размером более 10 см, на водохранилище Дрозды – 5–10 см, на озере Жлобинском – примерно одинаковое количество отходов размером 2–5 см и более 10 см. Повторные исследования, выполненные на Чижовском и Цнянском водохранилищах, свидетельствуют об изменении соотношения отходов по размерам. Это объясняется периодической или регулярной уборкой прибрежных зон. Вероятно, мелкие фрагменты чаще остаются незамеченными при проведении уборки. Что касается минимального количества обнаруженных отходов размерами менее 1 см и 1–2 см, то, по-видимому, это связано с методом учета отходов. Как указано выше, при маршрутном методе мелкие фрагменты, оказавшиеся в густой траве или перекрытые листвой, могут остаться неучтеными. Часть отходов загрязняется или втаптывается, особенно на заболоченных участках, и также не учитывается.



**Рис. 5. Процентное соотношение отходов пластика в рыболовных местах по их размерам**

**Fig. 5. Percentage of plastic waste in fishing areas by their size**

Полученные данные пока не позволяют оценить тренды в накоплении отходов пластика (макропластика) в местах рыбалки. Как известно, не все прибрежные зоны водоемов и водотоков даже в городах охвачены регулярными уборками; обычно проводятся ежегодные весенние акции по очистке территорий от мусора. Обнаруженные нами в ряде случаев полиэтиленовые пакеты были покрыты водорослевой пленкой, бутылка – ракушками, некоторые фрагменты упаковок или полиэтиленовой пленки перекрыты почвой, что свидетельствует о продолжительном их нахождении в окружающей среде. Однако для оценки аккумуляции пластика необходимы дополнительные исследования.

Несомненно, такие отходы пластика, как бутылки, пакеты, упаковка от пищевых продуктов, сложно отнести к конкретному виду пользователей прибрежной зоны. Организация пикников, прогулки вдоль берега, отдых на берегу – все это может накладываться одно на другое и перекрываться в случае неправильной организации сбора мусора или неправильной утилизации отходов отдыхающими. По мнению [18], рыбаки-любители более осведомлены о негативных последствиях воздействия отходов на аквальные системы и способны проявлять большую близость к окружающей среде в отношении утилизации отходов. Согласно действующим в Беларуси правилам любительского рыболовства [19], рыбаки обязаны «...поддерживать надлежащее санитарное состояние рыболовных угодий, не оставлять на их берегах, а также на льду мусор и другие отходы, не допускать засорения и загрязнения рыболовных угодий иным образом» (п. 39). Однако высокий уровень загрязнения ряда рыболовных мест – явное подтверждение вклада данного вида рекреации в общую картину загрязнения водоемов и прибрежных зон пластиком и свидетельство необходимости повышения культуры поведения.

**Заключение.** Выполненные исследования позволяют заключить, что прибрежные зоны водоемов и водотоков в местах любительской рыбалки загрязнены отходами пластика, который нашел широкое применение для различных целей, в том числе рыболовных снастей. Установлено, что их доля в общем количестве отходов пластика составляет 19 %, тогда как вклад отходов бытового назначения достигает 66 %. Доминирование в местах рыбалки последней категории отходов связано с использованием одноразовой упаковки и посуды. Количество макропластика в местах рыбалки существенно различаются: от 0,03 до 13,3 шт./м<sup>2</sup>.

Судя по перечню обнаруженных видов изделий (103 наименования), рыбаки используют вспомогательные материалы из пластика для организации мест рыбалки (пенопласт, полиэтиленовая пленка), а также для подготовки снастей и (или) их мелкого ремонта. Особого внимания заслуживают места рыбалки, где уровень их загрязнения макропластиком определяется использованием подручных средств (включая бутылки, пенопласт, полиэтиленовую пленку) и других материалов для организации подходов к воде. Не исключен также привнос пластиковых изделий и, соответственно, отходов на берега рек и водоемов другими категориями отдыхающих.

Пластиковые предметы или отходы на берегу могут перемещаться в воду, загрязняя мелководную зону и прибрежную растительность и тем самым представляя угрозу водоплавающим птицам и другим обитателям аквальных систем. Аккумуляции пластика в прибрежной зоне способствует травянистая/болотная или кустарниковая растительность, где отходы закрепляются и с течением времени перекрываются листвой и опадом.

В целом результаты работы свидетельствуют о загрязнении мест любительской рыбалки и подтверждают необходимость дальнейших исследований для разработки рекомендаций по улучшению сбора отходов пластика и предотвращению его рассеяния в прибрежной зоне.

#### Список использованных источников

1. Rivers as plastic reservoirs / T. van Emmerik [et al.] // Frontiers in Water. – 2022. – Vol. 3. doi:10.3389/frwa.2021.786936
2. Plastic debris in lakes and reservoirs / V. Nava [et al.] // Nature. – 2023. – Vol. 619. – P. 317–322. doi:10.1038/s41586-023-06168-4
3. Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean / D. Gonzalez-Fernandez [et al.] // Nature Sustainability. – 2021. – Vol. 4. – P. 474–483.
4. From source to sea: Floating macroplastic transport along the Rhine river / B. Kuizenga [et al.] // Frontiers in Environmental Science. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1180872. doi:10.3389/fenvs.2023.1180872
5. Plastic Pirates sample litter at rivers in Germany – Riverside litter and litter sources estimated by schoolchildren / K. Knickmeier [et al.] // Environmental Pollution. – 2019. – P. 545–557. doi:10.1016/j.envpol.2018.11.025
6. Marine Litter Pollution in Baltic Sea Beaches: Application of the Sand Rake Method / M. Haseler [et al.] // Frontiers in Environmental Science. – 2020. – Vol. 8. – Art. 19. – P. 1–14.
7. van Emmerik, T. Plastic Debris in Rivers / T. van Emmerik, A. Schwarz // WIREs Water. – 2020. – Vol. 7 (1). – P. 1–24. doi:10.1002/wat2.1398

8. Habitat characteristics, hydrology and anthropogenic pollution as important factors for distribution of biota in the middle Paraná River, Argentina / M. C. M. Blettler // *Ecohydrology & Hydrobiology*. – 2018. – P. 1–11. doi:10.1016/j.ecohyd.2018.08.002
9. Blettler, M. C. Threats underestimated in freshwater plastic pollution: mini-review / M. C. Blettler, K. M. Wantzen // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2019. – Vol. 230 (7). – P. 174.
10. Source, fate and management of recreational fishing marine debris / A. Watson [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. – 2022. – Vol. 178. – Art. 113500. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.113500
11. Erasmus, V. N. Commercial fishing vessels as marine-based sources of plastic pollution: The Namibian perspective / V. N. Erasmus, T. Kadhila, H. A. Tshithigona // *Ocean & Coastal Management*. – 2024. – Vol. 258. – Art. 107376. doi:10.1016/j.ocescoaman.2024.107376
12. Online Portal for Marine Litter [Electronic resource]. – Mode of access: <https://litterbase.awi.de/>. – Date of access: 01.11.2024.
13. Иванова, Л. В. Тенденции загрязнения пластиком акваторий и побережья Баренцева моря и сопредельных вод в условиях изменения климата / Л. В. Иванова, К. М. Соколов, Г. Н. Харитонова // Арктика и Север. – 2018. – Т. 32. – С. 121–145. doi:10.17238/issn2221-2698.2018.32.121
14. Методические подходы к изучению загрязнения почв пластиком и микропластиком / Т. И. Кухарчик // Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества, Минск, 8–13 апр. 2024 г. : в 7 ч. – Минск : БГУ, 2024. – Ч. 4 : Почвенные и геохимические исследования. Геоинформационные технологии / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Е. Г. Колымакова (гл. ред.) [и др.]. – С. 164–168. <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310906/1/Bel.Geo.Congress.4.pdf>
15. Hanke, G., Walvoort, D. J. J., van Loon, W. M. G. M., Addamo, A. M., Brosich, A., del Mar Chaves Montero, M., Jack M. E. M., Vinci, M., Giorgetti, A. 2019. EU Marine Beach Litter Baselines. Analysis of a pan-European 2012–2016 beach litter dataset. TG ML report, EUR30022 EN.
16. Riverbank macrolitter in the Dutch Rhine – Meuse delta / T. van Emmerik [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2020. – Vol. 15 (10). – Art. 104087. doi:[doi.org/10.1088/1748-9326/abb2c6](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb2c6)
17. Cooper, D. A. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii // D. A. Cooper, P. L. Corcoran. – *Marine Pollution Bulletin*. – 2010. – Vol. 60 (5). – P. 650–654.
18. Browne, A. Fishing for answers- the final report of the social and community benefits of angling project / A. Browne, N. Djohari, P. Stolk // *SubStance*. – 2012. – P. 1–95.
19. О рыболовстве и рыболовном хозяйстве : Указ Президента Респ. Беларусь, 21 июля 2021 г., № 284 : в редакции Указа Президента Респ. Беларусь от 23.06.2023 № 180 // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. – 2021. – № 284. – 1/19821.

## References

1. van Emmerik, T., Mellink, Y., Hauk, R., Waldschläger, K., Schreyers, L. Rivers as plastic reservoirs. *Frontiers in Water*, 2022, vol. 3. doi:10.3389/frwa.2021.786936
2. Nava, V., Chandra, S., Aherne, J., e.a. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature*, 2023, vol. 619, pp. 317–322. doi:10.1038/s41586-023-06168-4
3. Gonzalez-Fernandez, D., Cozar, A., Hanke, G., e.a. Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. *Nature Sustainability*, 2021, vol. 4, pp. 474–483.
4. Kuizenga B., Tasseron P. F., Wendt-Pothoff K., van Emmerik T. H. M. From source to sea: Floating macroplastic transport along the Rhine river. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, vol. 11, art. 1180872. doi:10.3389/fenvs.2023.1180872
5. Kiessling T., Knickmeier K., Kruse K., Brennecke D., Nauendorf A., Thiel M. Plastic Pirates sample litter at rivers in Germany – Riverside litter and litter sources estimated by schoolchildren. *Environmental Pollution*, 2019, pp. 545–557. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.025>
6. Haseler M., Balciunas A., Hauk R., Sabaliauskaitė V., Chubarenko I., Ershova A., Schernewski G., e.a. Marine Litter Pollution in Baltic Sea Beaches – Application of the Sand Rake Method. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, vol. 8, art. 19, pp. 1–14.
7. van Emmerik T., Schwarz A. Plastic Debris in Rivers. *WIREs Water*, 2020a, vol. 7 (1), pp. 1–24. doi:10.1002/wat2.1398
8. Blettler M. C. M., Oberholster P. J., Madlala T., Eberle E. G., Amsler M. L., De Klerk A. R., Szupiany R. Habitat characteristics, hydrology and anthropogenic pollution as important factors for distribution of biota in the middle Paraná River, Argentina. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2018, pp. 1–11. doi:10.1016/j.ecohyd.2018.08.002
9. Blettler M. C., Wantzen K. M. Threats underestimated in freshwater plastic pollution: mini-review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, vol. 230 (7), pp. 174.
10. Watson A., Blount C., McPhee D. P., Zhang D., Lincoln Smith M., Reeds K., Williamson J. Source, fate and management of recreational fishing marine debris. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, vol. 178, art. 113500. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.113500
11. Erasmus V. N., Kadhila T., Tshithigona Tshiningombwa Amesho, Mabilana, H. A. Commercial fishing vessels as marine-based sources of plastic pollution: The Namibian perspective. *Ocean & Coastal Management*, 2024, vol. 258, art. 107376. doi:[doi.org/10.1016/j.ocescoaman.2024.107376](https://doi.org/10.1016/j.ocescoaman.2024.107376)
12. Online portal on marine debris. Available at: <https://litterbase.awi.de/> (accessed 1 November 2024).

13. Ivanova L. V., Sokolov K. M., Haritonova G. N. *Tendentsii zagrjaznenija plastikom akvatorij i poberezh'ja Barentseva morja i sopredel'nyh vod v uslovijah izmenenija klimata* [Trends in plastic pollution of the waters and coast of the Barents Sea and adjacent waters in the context of climate change]. *Arktika i Sever*, 2018, vol. 32, pp. 121–145. doi:10.17238/issn2221-2698.2018.32.121 (in Russian)
14. Kuharchik T. I., Kakareka S. V., Rjabychin K. O., Meleshko A. A., Chernjuk V. D., Kudrevich M. A. *Metodicheskie podhody k izucheniju zagrjaznenija pochv plastikom i mikroplastikom* [Methodological approaches to the study of soil contamination by plastics and microplastics]. *Materialy 1 Belorusskogo geograficheskogo kongressa: k 90-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta i 70-letiyu Belorusskogo geograficheskogo obshchestva* [Proc. 1 Belarusian Geographical Congress: to the 90th anniversary of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University and the 70th anniversary of the Belarusian Geographical Societies]. *Pochvennye i geohimicheskie issledovanija. Geoinformatsionnye tehnologii* [Soil and geochemical studies. Geoinformation technologies]. In 7 parts, part 4. Minsk, 2024, pp. 164–168. <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/310906/1/Bel.Geo.Congress.4.pdf> (in Russian)
15. Hanke G., Walvoort D. J. J., van Loon W. M. G. M., Addamo A. M., Brosich A., del Mar Chaves Montero M., Jack M. E. M., Vinci M., Giorgetti A. 2019. EU Marine Beach Litter Baselines. Analysis of a pan-European 2012–2016 beach litter dataset. *TG ML report*, EUR30022 EN.
16. van Emmerik T., Roebroek C., de Winter W., Vriend P., Boonstra, M. Hougee M. Riverbank macrolitter in the Dutch Rhine – Meuse delta. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15 (10), art. 104087. doi:10.1088/1748-9326/abb2c6
17. Cooper D. A., Corcoran P. L. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, vol. 60 (5), pp. 650–654.
18. Browne A., Djohari N., Stolk P. Fishing for answers – the final report of the social and community benefits of angling project. *SubStance*, 2012, pp. 1–95.
19. *O rybolovstve i rybolovnom hozajstve: Uzak prezidenta Respubliki Belarus' ot 21.07.2021 g. № 284: v redaktsii Ukaza Prezidenta Respubliki Belarus' ot 23 iyunja 2023 goda nomer 80* [On Fishing and Fishery: Decree of the President of the Republic of Belarus No. 284 of 21 July 2021: as amended by Decree of the President of the Republic of Belarus No. 180 of 23 June 2023]. *Natsional'nyj pravovoj internet-portal Respubliki Belarus'*= National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus, 2021, no. 284, 1/19821 (in Russian)

#### Информация об авторах

**Кухарчик Тамара Иосифовна** – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

**Мелешко Анастасия Андреевна** – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nestassia@gmail.com

**Синицкая Марина Леонидовна** – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marina.si.mary@gmail.com

#### Information about the authors

**Tamara I. Kukharchyk** – D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

**Anastasiya A. Meleshko** – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nestassia@gmail.com

**Marina L. Sinitskaya** – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marina.si.mary@gmail.com

## ОЦЕНКИ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОВЕЖСКОЙ ПУЩИ С УЧЕТОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОПУСКОВ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НАБЛЮДЕНИЙ

С. А. Лысенко, Е. В. Гапанович

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** В работе представлены оценки долгопериодных изменений уровенного режима подземных вод Беловежской пущи с учетом восстановления пропусков в рядах стационарных гидрогеологических наблюдений. Для заполнения пропусков во временных рядах уровней подземных вод использован модифицированный вариант метода  $k$ -ближайших соседей ( $k$ -nearest neighbor – KNN), учитывающий как пространственную, так и временную автокорреляцию уровней подземных вод. Предложенный метод позволил реконструировать динамику уровней подземных вод за последние 50 лет с относительной погрешностью менее 2–3 % для грунтовых вод и вод спорадического распространения и менее 10 % для напорных межпластовых вод.

Статистически значимый тренд долгопериодного изменения уровенного режима подземных вод на уровне  $\alpha = 0,01$  по критерию Манна – Кендалла отмечается для 33 из 40 гидрогеологических скважин. Оценки трендов уровней подземных вод по методу Тейла – Сена показывают, что за период потепления в Беларусь (с 1989 г.) уровни грунтовых вод понизились в среднем на 35 см, напорных вод – на 25, вод спорадического распространения – на 53 см. Наибольшая величина наклона тренда отмечается для вод спорадического распространения Бровского гидрогеологического поста – 0,34 м/10 лет.

**Ключевые слова:** изменения климата; грунтовые воды; напорные воды; воды спорадического распространения; пропуски данных; гидрогеологический режим; особо охраняемые природные территории.

**Для цитирования.** Лысенко С. А., Гапанович Е. В. Оценки долгопериодных изменений уровенного режима подземных вод Беловежской пущи с учетом восстановления пропусков во временных рядах наблюдений // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 70–78.

## ESTIMATION OF THE LONG-PERIOD CHANGES OF GROUNDWATER LEVEL REGIME ON THE TERRITORY OF BELOVEZHSKAYA PUSHCHA TAKING INTO ACCOUNT THE OMISSIONS RESTORATION IN THE TIME SERIES OF OBSERVATIONS

S. A. Lysenko, E. B. Gapanovich

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

**Abstract.** The paper presents estimation of the long-period changes of groundwater levels in Belovezhskaya Pushcha taking into account the omissions restoration in the series of stationary hydrogeological observations. A modified version of the  $k$ -nearest neighbour (KNN) method, which takes into account both spatial and temporal autocorrelation of groundwater levels, was used to fill in the gaps in the time series of groundwater levels. The proposed method made it possible to reconstruct the dynamics of groundwater levels of different types of different genesis for the last 50 years with a relative error of less than 2–3 % for groundwater and sporadic waters and less than 10 % for pressurised interstratum waters.

Statistically significant trend of long-period change of groundwater levels at the level  $\alpha = 0.01$  according to the Mann – Kendall criterion is observed for 33 out of 40 hydrogeological wells, including 13 groundwater wells, 16 sporadic water wells and 4 pressure water wells. Estimates of groundwater level trends using the Theil – Sen method show that during the warming period in Belarus (since 1989) groundwater has decreased on average by 35 cm, pressure water by 25 cm, and sporadic water by 53 cm. The highest value of the trend slope is observed for sporadic waters of the Brovsky hydrogeological post – 0.34 m/10 years.

**Keywords:** climate change; groundwater; pressure water; sporadic water; data omissions; hydrogeological regime; specially protected natural areas.

**For citation.** Lysenko С. А., Gapanovich Е. В. Estimation of the long-period changes of groundwater level regime on the territory of Belovezhskaya Pushcha taking into account the omissions restoration in the time series of observations *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 70–78.

**Введение.** В последние десятилетия изменение климата и антропогенная деятельность существенно повлияли на системы пресных подземных вод во всем мире. В Беларуси в настоящее время риск дефицита питьевой воды классифицируется как ниже среднего. Однако за последние 20 лет частота засух существенно возросла. Периоды засух наблюдались в 2002, 2010, 2013, 2014, 2015, 2018, 2021 и 2023 г. Ожидается, что к 2050 г. в количестве летних осадков в большинстве регионов Беларуси сократится, а среднегодовая температура, по сравнению с периодом 1961–1990 гг., повысится на 2,9–3,7 °C, что, несомненно, приведет к изменениям в состоянии подземных вод и скорости пополнения их запасов [1, 2].

В свою очередь, изменение уровняного режима и качественного состояния подземных вод может иметь ощущимые последствия для биологической продуктивности и видового разнообразия биоценозов. Особенно уязвимыми в этом плане являются древнейшие реликтовые лесные массивы, сохранившиеся на территории Беловежской пущи.

Как показывают данные наблюдений [3], потепление на территории белорусской части Беловежской пущи происходит без заметных изменений годового и сезонного количества атмосферных осадков. Однако отмечаются изменения в интенсивности, продолжительности выпадения и фазовом составе осадков [4–6]. Количество зимних дней с отрицательными температурами и обильными снегопадами сокращается, при этом увеличиваются число дней с осадками малой интенсивности и продолжительность выпадения осадков в виде дождя и мокрого снега [6]. В летний сезон отмечаются сокращение продолжительности выпадения осадков и одновременное увеличение максимальных сумм осадков, увеличиваются повторяемость засух и продолжительность засушливых периодов [6].

Наблюданное изменение климата оказывает значительное воздействие на гидрогеологический режим Беловежской пущи. При этом под угрозой оказываются продуктивность экосистем и биоразнообразие на территории заповедника [7–9]. Для недопущения необратимой утраты биоразнообразия этого уникального природного объекта необходимо понимание текущего состояния и будущих изменений уровенного режима его подземных вод.

Цель работы – дать оценку долгопериодным изменениям естественных уровней подземных вод Беловежской пущи с учетом большого количества пропусков в рядах стационарных гидрогеологических наблюдений.

**Автозаполнение пропусков во временных рядах гидрогеологических наблюдений.** Основой для проведения исследования послужили данные стационарных наблюдений за подземными водами Беловежской пущи по 6 гидрогеологическим постам, включающим 40 наблюдательных скважин на воды различного генезиса (грунтовые воды (со свободной поверхностью), приуроченные к аллювиальным, флювиогляциальным и озерно-болотным отложениям; воды спорадического распространения, приуроченные к песчаным прослойям и линзам в толще моренных отложений; напорные межпластовые воды, приуроченные к днепровско-сожским и березинско-днепровским водноледниковым отложениям) (см. таблицу).

#### Сеть наблюдательных скважин за подземными водами на территории Беловежской пущи

#### A network of observation wells for groundwater in the territory of Belovezhskaya Pushcha

Пост	Номера наблюдательных скважин		
	грунтовых	спорадического распространения	напорных
Бровский	662, 663, 665, 666	–	500, 501, 502, 660
Глубонецкий	519, 562, 770, 773	523, 564, 777	513, 514, 515
Каменюкский	164	635	634
Хвойникский	647, 650	649, 652	–
Центрально-Беловежский, Ляцкие	1350, 1352, 135	643, 645, 653, 655, 656, 657, 659, 704, 706, 707, 710, 712	–

Размещение сети наблюдательных скважин за подземными водами по территории Беловежской пущи является неравномерным и характеризуется высокой локальной густотой наблюдательной сети, отвечающей различным целям ее устройства в разные годы.

Как показал предварительный анализ данных инструментальных наблюдений за уровнем подземных вод (УПВ), исходные данные содержат большое количество пропусков, иногда по году и более, и нуждаются в применении к ним специальных методов заполнения пропусков во временных рядах. Для этой цели нами был использован модифицированный вариант метода *k*-ближайших соседей (*k*-nearest neighbor – KNN).

Идея классического метода KNN в задаче пространственной интерполяции данных состоит в следующем. Первоначально выбирают число *k* и метрику расстояния между точками. Расстояние может

быть любой метрической мерой, однако стандартное евклидово расстояние является наиболее распространенным выбором. Количество ближайших соседей  $k$  может быть заданной пользователем константой или изменяться в зависимости от локальной плотности точек в пределах окружности заданного радиуса.

Для каждого пункта наблюдений, в котором на некоторую дату отсутствует значение, выбирают  $k$  ближайших соседних пунктов, не имеющих пропусков на эту дату. Значение в центральном пункте вычисляют в виде средневзвешенной суммы значений его ближайших соседей:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^k z_i}{\sum_{i=1}^k 1/d_{i,0}^\alpha}, \quad (1)$$

где  $z_0$  и  $z_i$  – значения интересующей физической величины в центральном пункте и его ближайших соседей соответственно;  $d_{i,0}$  – расстояние до  $i$ -го соседа;  $\alpha$  – параметр, определяющий радиус окрестности в которой осуществляется поиск соседних пунктов наблюдений (чем выше данный параметр, тем быстрее убывает вклад в каждого соседа с расстоянием до целевого пункта). Таким образом, данный алгоритм включает два априорно задаваемых гиперпараметра –  $k$  и  $\alpha$ , которые необходимо тщательно выбирать на основе анализа ретроспективных данных.

Недостатком классического варианта KNN в нашей задаче заполнения пропусков во временных рядах гидрогеологических наблюдений являются учет в нем только пространственной корреляции между УПВ на разных скважинах и полное игнорирование их временной корреляции. Кроме того, по причине частых пропусков в данных наблюдений на разных скважинах, множество пунктов наблюдений (скважин) с доступными данными каждый раз будет отличаться, что затрудняет выбор ближайших соседей.

Нами был использован усовершенствованный вариант метода KNN, учитывающий как пространственную, так и временную автокорреляцию УПВ. Интерполяционную модель строим отдельно для каждой пропущенной точки временного ряда УПВ каждой гидрогеологической скважины. Так, для скважины №  $n$ , для которой на дату наблюдений  $t_m$  по тем или иным причинам не проводилось измерение УПВ  $z_n(t_m)$ , ищем все доступные на эту дату значения УПВ  $z_i(t_m)$  на всех других гидрогеологических скважинах, где  $z_i(t_m) \in O_m$  принадлежит множеству наблюдений  $O_m$  на дату  $t_m$ , причем  $z_i(t_m) \notin O_m$  и  $i \neq n$ . При этом в множество  $O_m$  входят наблюдения для всех водоносных горизонтов, вне зависимости от того, к какому горизонту относится скважина  $n$ . Далее выбираем все даты пересечения временных рядов из множества  $O_m \cup \{z_n(t)\}$  и на их основе составляем выборку для обучения интерполяционной модели для скважины  $n$  на дату наблюдений  $t_m$ . Компонентами многомерного вектора признаков в этой выборке являются значения УПВ  $z_i(t_m)$  на множестве скважин на некоторую дату наблюдения  $t_m$ , а целевым параметром – значение УПВ на скважине  $n$  –  $z_n(t_m)$ .

К вышеописанной обучающей выборке данных применяем стандартный метод KNN.

Оптимальное значение  $k$  в вышеописанном методе выбираем отдельно для каждой интересующей даты  $t_m$  путем вложенной перекрестной проверки с разбиением выборки на обучающие и испытательные блоки. Первоначально строим линейную регрессию между значениями УПВ на целевой скважине и ближайшей к ней скважине, затем аналогичную регрессию строим уже с рассмотрением двух ближайших скважин, затем трех и т. д. Качество восстановления пропущенного значения УПВ на целевой скважине оцениваем на основе вложенной перекрестной проверки по  $N = 5$  блокам с данными из обучающей выборки. Для этого организовываем внешний цикл по ближайшим соседям  $k = 1, \dots, K$ , где  $K$  – общее количество доступных на интересующую дату пунктов наблюдений, а также внутренний цикл по  $N$  блокам для разбиения временных рядов наблюдательных пунктов на обучающие и испытательные блоки. После обучения KNN-модели на обучающем блоке оцениваем ее эффективность с применением испытательного блока. Оптимальное значение  $k$  выбираем таким, при котором достигается минимальное значение средней относительной погрешности (Mean Absolute Percentage Error – MAPE), вычисляемой по результатам испытания модели на испытательных блоках. Значение MAPE для каждого испытательного блока вычисляем по формуле

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n_{\text{samples}}} \sum_{i=0}^{n_{\text{samples}}-1} \frac{|z_i - \hat{z}_i|}{\max(\epsilon, |z_i|)}, \quad (2)$$

где  $z_i$  и  $\hat{z}_i$  – фактическое и предсказанное моделью значение  $i$ -го элемента в испытательном блоке;  $n_{\text{samples}}$  – общее количество элементов в испытательном блоке;  $\epsilon$  – произвольное малое, но строго

положительное число, которое вводится для того, чтобы избежать неопределенных результатов, когда  $z_i$  близко к нулю.

Если построить график зависимости средней по испытательным блокам зависимости MAPE от параметра  $k$ , то получится кривая, похожая на ту, что изображена на рис. 1. Минимальное значение MAPE определяет выбор оптимального значения  $k = k_{\text{opt}}$  (в данном случае  $k_{\text{opt}} = 10$ ). Наличие минимума на этом графике связано с тем, что при малых значениях  $k$  KNN-модель не обеспечивает удовлетворительной точности интерполяции, а при больших  $k$  происходит переобучение (или переподгонка) модели, когда качество модели на обучающей выборке оказывается существенно выше, чем на тестовой выборке.

Анализ точности интерполяции УПВ описанным выше методом для разных скважин на территории Беловежской пущи показывает, что коэффициент корреляции фактических и восстановленных значений УПВ находится на уровне не ниже 0,8.

Статистические оценки относительной погрешности восстановления пропущенных значений УПВ, полученные методом перекрестной проверки, показывают, что для грунтовых вод и вод спорадического распространения MAPE не превышает 2–3 %. Наибольшие величины MAPE (10–15 %) приурочены скважинам на напорные межпластовые воды.

Примеры применения описанного выше метода заполнения пропусков во временных рядах гидрогеологических данных представлены на рис. 2. Видно, что используемый метод позволяет вполне адекватно реконструировать динамику УПВ для всех водоносных горизонтов на протяжении всего периода инструментальных наблюдений.

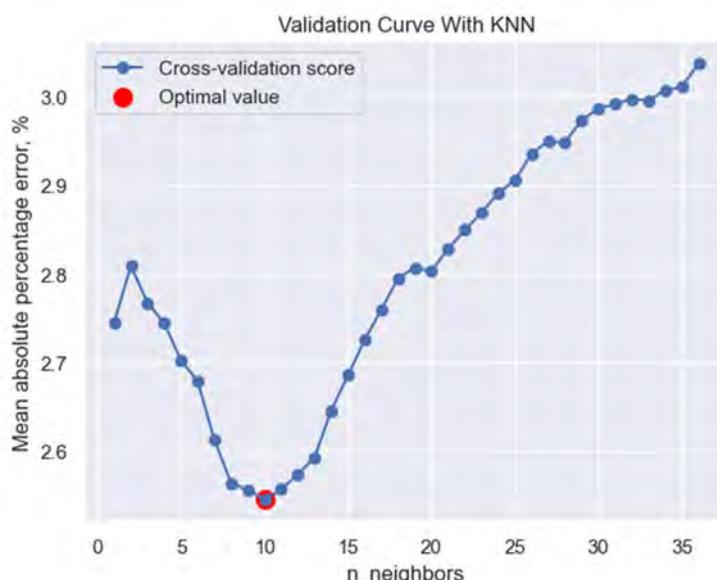


Рис. 1. Средняя по тестовым блокам погрешность MAPE восстановления уровня вод спорадического распространения по скважине № 635 Каменюкского гидрогеологического поста по значениям уровней подземных вод на  $k$  соседних скважинах

Fig. 1. Average MAPE error of sporadic water level reconstruction at well no. 635 of Kamenyuk hydrogeological post on the basis of groundwater level values at  $k$  neighbouring wells

**Анализ долгопериодных трендов изменений уровней подземных вод.** Для понимания современных тенденций изменения ресурсов подземных вод Беловежской пущи рассмотрим оценки трендов УПВ для скважин на грунтовые (Ground), напорные (Confined) и воды спорадического распространения (Sporadic).

Стоит отметить, что стандартный метод оценки тренда, основанный на методе наименьших квадратов и вычислении наклона линии регрессии, плохо работает для несимметричных и гетероскедастичных данных, к которым относятся временные ряды УПВ. Кроме того, этот метод чувствителен к выбросам (аномалиям в данных). Для более точного выявления линейного тренда нами была использована непараметрическая оценочная функция Тейла – Сена. Для множества точек на плоскости  $(t_i, z_i)$  эта функция определяется как медиана  $m$  коэффициентов наклона  $(z_j - z_i) / (t_j - t_i)$  по всем парам точек выборки (временного ряда). Точка  $b$  пересечения трендом оси  $z$  равна медиане значений  $y_i - mx_i$ .

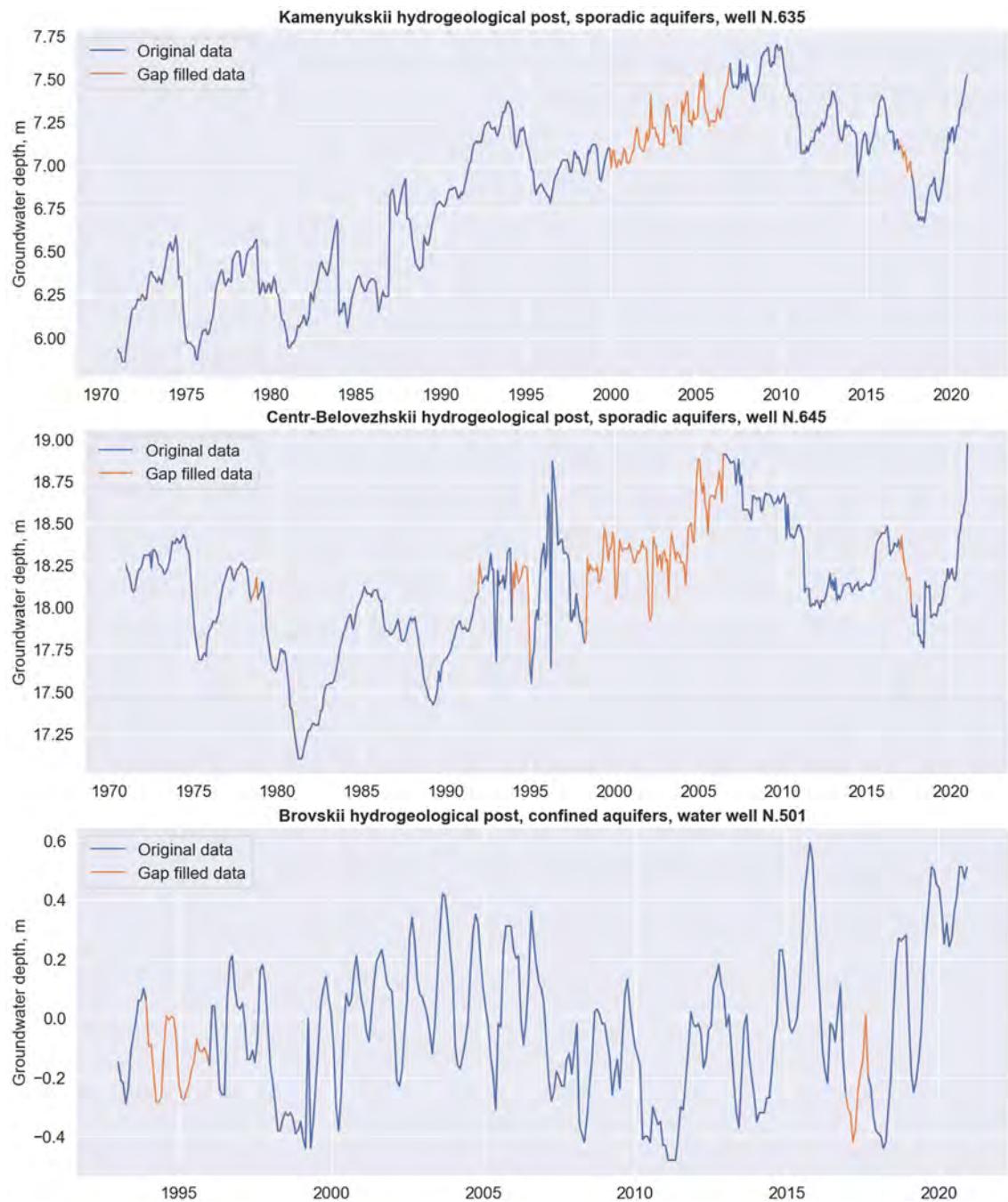


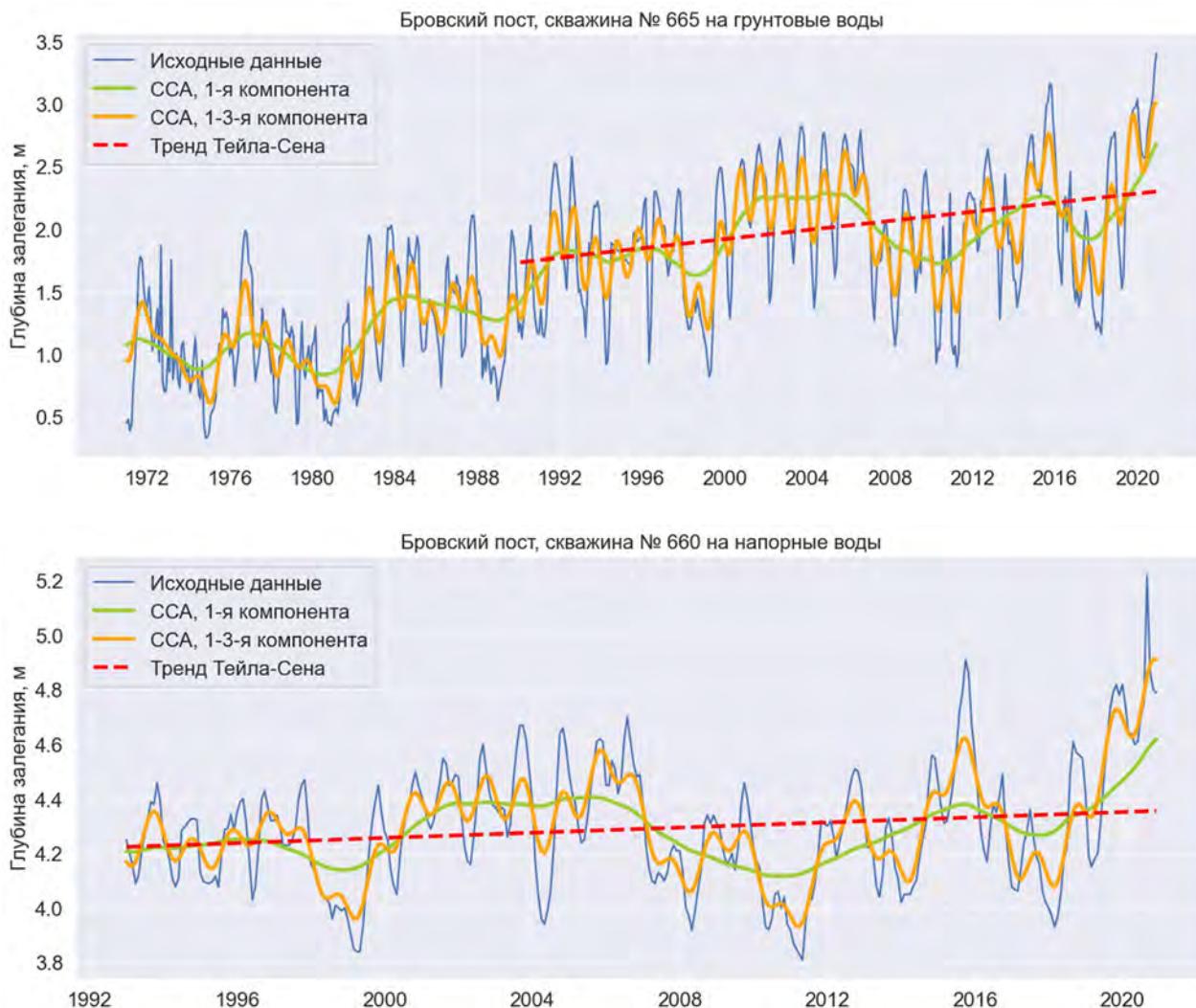
Рис. 2. Примеры заполнения пропусков во временных рядах наблюдательных гидрогеологических скважин, расположенных в белорусской части Беловежской пущи

Fig. 2. Examples of filling in the gaps in the time series of hydrogeological observation wells located in the Belarusian part of Belovezhskaya Pushcha

Нелинейные тренды временных рядов УПВ выделяли методом спектрального сингулярного анализа (CCA) [10], основанном на представлении временного ряда совокупностью скользящих отрезков заданной длины  $L$  и применении к ним метода главных компонент. В нашем анализе использовали длину окна  $L = 30$  лет, рекомендуемую Всемирной метеорологической организацией для климатического усреднения.

Статистическую значимость трендов оценивали на основе непараметрического теста Манна – Кендалла [11]. Данный тест позволяет принимать или отвергать при заданном уровне значимости а нулевую гипотезу  $H_0$  об отсутствии монотонной тенденции во временном ряду на основании статистик, рассчитываемых по разностям между увеличивающимися или уменьшающимися парами значений в исследуемом временном ряду.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты анализа временных рядов уровней грунтовых и напорных вод. Помимо линейных трендов, оцениваемых для периода современного потепления в Беларусь (с 1989 г.), на графиках также представлены первые компоненты разложения временных рядов, выбирающие наибольшую долю их суммарной дисперсии. Согласно оценкам коэффициента линейного тренда, на рассматриваемых пунктах наблюдений грунтовые воды за период потепления понизились примерно на 63 см, а напорные воды – на 18 см. На более коротких временных масштабах изменчивость подземных вод определяется годовым ходом и квазипериодической компонентой с периодом около 14 лет. Во временном ряду уровня напорных вод помимо прочего присутствует структурный сдвиг (скачкообразное изменение вероятностных характеристик временного ряда), вероятно, вызванный антропогенной деятельностью.



**Рис. 3. Временные ряды уровней грунтовых и напорных межпластовых вод по скважинам № 660 и 665 Бровского гидрогеологического поста, первые компоненты их сингулярного спектра и линейные тренды, рассчитанные методом Тейла – Сена**

**Fig. 3. Time series of groundwater and pressure interstratum water levels at wells no. 660 and 665 of the Brovsky hydrogeological post, the first components of their singular spectrum and linear trends calculated by the Theil – Sen method**

Оценки коэффициентов линейных трендов УПВ по всем наблюдательным скважинам Беловежской пущи, систематизированные по типу вод и гидрогеологическим постам, представлены на рис. 4. Статистически значимый тренд УПВ на уровне  $\alpha = 0,01$  отмечается для 33 из 40 гидрогеологических скважин, из них 13 скважин на грунтовые воды (87 %), 16 скважин на воды спорадического распространения (89 %) и 4 скважины на напорные воды (57 %). Наибольшая величина наклона тренда отмечается для вод спорадического распространения Бровского гидрогеологического поста – 0,34 м/10 лет.

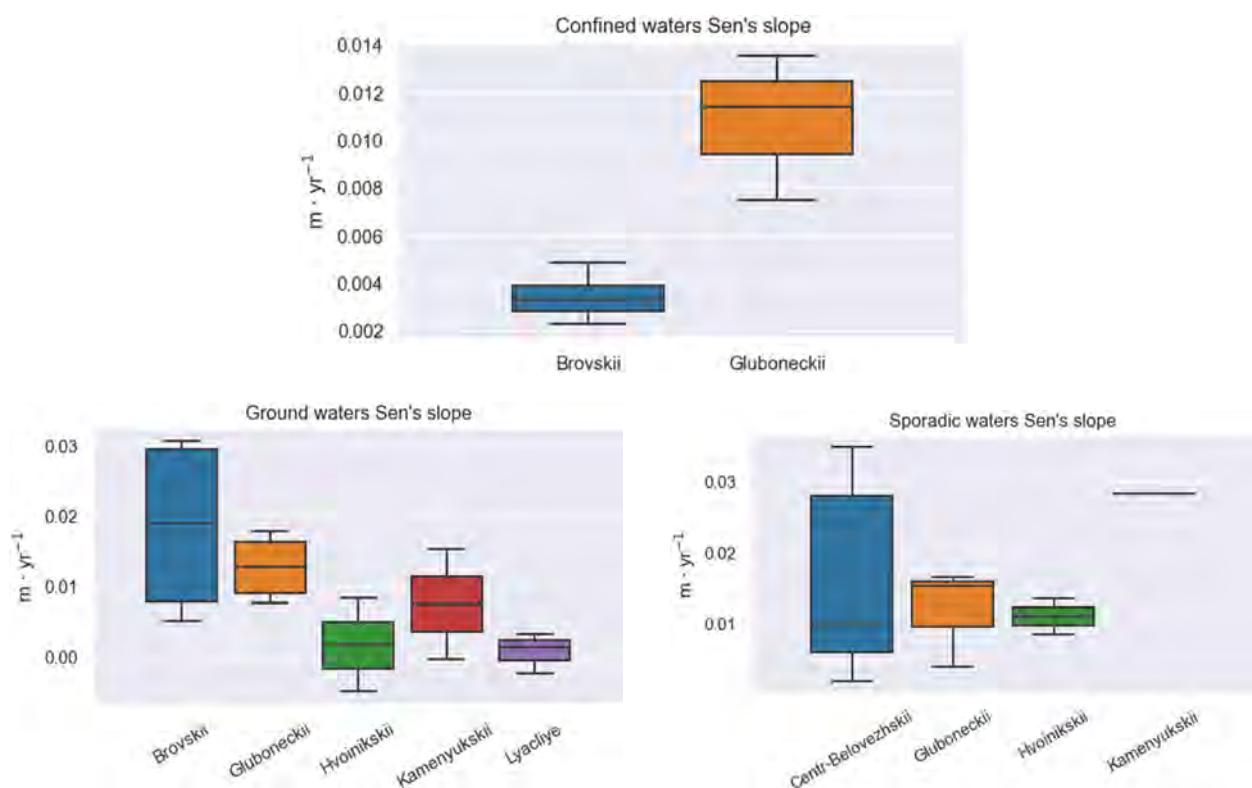


Рис. 4. Оценки коэффициента линейного тренда по методу Тейла – Сена, сгруппированные по типу вод и гидрологическим постам

Fig. 4. Estimates of the linear trend coefficient using the Theil – Sen method, grouped by water type and hydrogeological stations

Диаграммы размаха коэффициента линейного тренда для различных типов вод, объединяющие данные всех гидрологических скважин Беловежской пущи, представлены на рис. 5. Наибольший коэффициент тренда свойственен водам спорадического распространения, наименьший – напорным водам. Полученные оценки трендов уровней подземных вод показывают, что за период потепления в Беларусь (с 1989 г.) грунтовые воды понизились в среднем на 35 см, напорные воды – на 25, воды спорадического распространения – на 53 см.

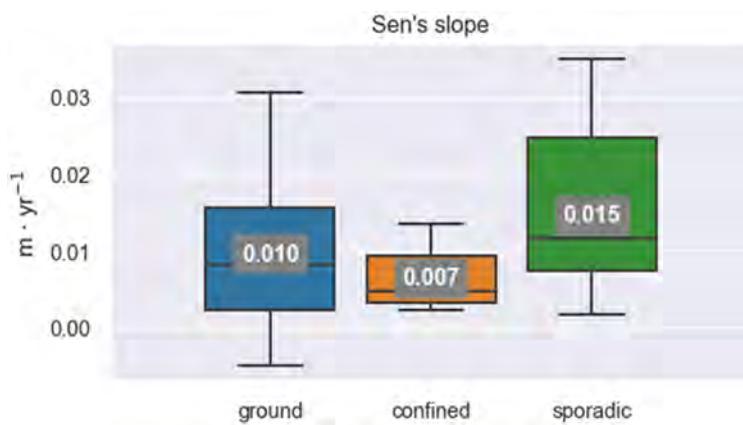


Рис. 5. Коэффициенты наклона тренда, сгруппированные по типу подземных вод

Fig. 5. Trend slope coefficients grouped by groundwater type

### **Выводы.**

1. С использованием модифицированного варианта метода *k*-ближайших соседей, учитывавшего пространственную и временную корреляцию результатов гидрогеологических наблюдений, впервые удалось реконструировать режим уровней грунтовых вод, вод спорадического распространения и напорных межпластовых вод Беловежской пущи и проанализировать тенденции их изменений за последние 50 лет.

2. Статистически значимый тренд на понижение уровня подземных вод (по критерию Манна – Кендалла при  $\alpha = 0,01$ ) отмечается в 13 из 15 наблюдательных скважин на грунтовые воды, в 16 из 18 скважин на воды спорадического распространения и в 4 из 7 скважин на напорные воды.

3. Наиболее значимые изменения естественных ресурсов подземных вод Беловежской пущи за отмеченный период коснулись вод спорадического распространения, приуроченных к песчаным прослойям и линзам в толще моренных отложений. Прослеживается устойчивая тенденция к падению их уровней со средней скоростью 15 см / 10 лет. Максимальная величина коэффициента линейного тренда по методу Тейла – Сена отмечается для вод спорадического распространения Бровского гидрогеологического поста – 0,34 м/10 лет.

4. Согласно выполненным оценкам трендов уровней подземных вод, за период потепления в Беларуси (с 1989 г.) уровни грунтовых вод понизились в среднем на 35 см, уровни напорных вод – на 25 и вод спорадического распространения – на 53 см.

### **Список использованных источников**

1. The changing nature of groundwater in the global water cycle / X. Kuang [et al.] // Science. – March 1, 2024. – Vol. 383. – P. 950–964.
2. Global groundwater warming due to climate change / S. A. Benz // Nature Geoscience. – 2024. – Vol. 17. – P. 545–551.
3. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 239 с.
4. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
5. Мельник, В. И. Изменение количества и вида атмосферных осадков в холодный период на территории Беларуси в условиях современного потепления климата / В. И. Мельник, И. В. Буяков, В. Д. Чернышев // Природопользование. – 2019. – № 2. – С. 44–51.
6. Данилович, И. С. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси / И. С. Данилович, В. Ф. Логинов // Гидрология и климатология. – 2021. – № 1–2. – С. 35–48.
7. Лысенко, С. А. Взаимосвязь современных изменений испарения и количества осадков в южных регионах Беларуси / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, Ю. А. Бондаренко. – Природопользование. – 2020. – № 1. – С. 20–29.
8. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
9. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // Метеорология и гидрология. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
10. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina [et al.] // J. Stat. Softw. – 2015. – Vol. 67, № 2. – P. 1–78.
11. Gilbert, R. O. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring / R. O. Gilbert. – New York : Wiley, 1987. – 336 p.

### **References**

1. Kuang X., Liu J., Scanlon B. R., e. a. The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, March 1, 2024, vol. 383, pp. 950–964.
2. Benz S. A., Irvine D. J., Rau, G. C., e. a. Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience*, 2024, vol. 17, pp. 545–551.
3. Volchek A. A., e. a. *Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata* [Water resources of Belarus and their forecast taking into account climate change]. Ed. A. A. Volchek, V. N. Korneev. Brest, 2017, 239 p. (in Russian)
4. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulatory Opportunities]. Minsk, 2020, 264 p. (in Russian)
5. Mel'nik V. I., Buyakov I. V., Chernyshev V. D. *Izmenenie kolichestva i vida atmosfernyh osadkov v holodnyj period na territorii Belarusi v usloviyah sovremenennogo potepleniya klimata* [Changes in the amount and type of atmospheric

- precipitation during the cold period in the territory of Belarus under the conditions of modern climate warming]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 2, pp. 44–51. (in Russian)
- 6. Danilovich I. S., Loginov V. F. *Tekushchie i ozhidaemye izmeneniya klimata na territorii Belarusi* [Current and expected climate changes on the territory of Belarus]. *Gidrologiya i klimatologiya = Hydrology and climatology*, 2021, no. 1–2, pp. 35–48. (in Russian)
  - 7. Lysenko S. A., Loginov V. F., Bondarenko Yu. A. *Vzaimosvyaz' sovremennoy izmeneniy ispareniya i kolichestva osadkov v yuzhnyh regionah Belarusi* [Relationship between modern changes in evaporation and precipitation in the southern regions of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 20–29. (in Russian)
  - 8. Lysenko S. A. *Klimatoobuslovленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларусь* [Climate-induced changes in bioproductivity of terrestrial ecosystems of Belarus]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*, 2019, no. 6, pp. 77–88. (in Russian)
  - 9. Lysenko S. A., Loginov V. F., Zajko P. O. *Vliyanie izmenenij klimata na bioproduktivnost' nazemnyh ekosistem v Belorussko-Ukrainskom Poles'e* [Impact of climate change on the bioproductivity of terrestrial ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie]. *Meteorologiya i hidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2022, vol. 47, no. 2, pp. 59–71. (in Russian)
  - 10. Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. *J. Stat. Softw.*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 1–78.
  - 11. Gilbert R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York, Wiley, 1987, 336 p.

#### Информация об авторах

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

Гапанович Екатерина Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kat@tut.by

#### Information about the authors

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

Ekaterina V. Gapanovich – Ph. D. (Technical), 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: kat@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-79-87>

УДК 614.841.42

Поступила в редакцию 22.07.2024

Received 22.07.2024

## ДИНАМИКА ПОЖАРОВ НА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

А. Н. Полюхович<sup>1</sup>, Д. Г. Груммо<sup>1, 2</sup>, Н. А. Зеленкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Институт экспериментальной ботаники НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** В статье представлена динамика пожаров на водно-болотных угодьях (ВБУ) международного значения Республики Беларусь за период 2001–2020 гг. К ВБУ с высокой общей площадью пожаров (общая площадь пожаров более 10 000 га) относится пять угодий, для пяти территорий характерна средняя площадь пожаров (от 10 000 га до 1000 га), на девяти ВБУ площадь пожаров низкая (менее 1000 га), на семи Рамсарских территориях пожары за рассматриваемый период не выявлены (ВБУ «Сервечь», «Березинский биосферный заповедник», «Болото Дикое», «Выгонощанско», «Дрожбитка – Свина», «Котра», «Острова Дулебы – Заозерье»). Для ВБУ «Вилейты», «Выдрица», «Голубицкая пуща», «Морочно», «Освейский», «Подвеликий Мог», «Полесская долина реки Буг», «Свислочско-Березинский» характерно повреждение экосистем пожарами только в единичные годы. Наибольшая площадь пожаров выявлена на территории ВБУ «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять» (общая площадь пожаров 42 474 га).

За исследуемый период наибольшая площадь пожаров по всем ВБУ была в 2002 г. – 46 222 га (пожары были зафиксированы на семи ВБУ). В 2007 г. не выявлено пожаров. В динамике пожаров на ВБУ можно выделить отдельные периоды с их наибольшим количеством: 2002–2004, 2011–2015 и 2018–2020 гг. В 2020 г. пожары зафиксированы только на пяти ВБУ.

**Ключевые слова:** водно-болотные угодья; Рамсарские территории; пожары; ВБУ «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять».

**Для цитирования.** Полюхович А. Н., Груммо Д. Г., Зеленкевич Н. А. Динамика пожаров на особо охраняемых территориях // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 79–87.

## DYNAMICS OF FIRES IN SPECIALLY PROTECTED AREAS

А. М. Палиухович<sup>1</sup>, Д. Г. Груммо<sup>1, 2</sup>, Н. А. Зеленкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Abstract.** The article presents the dynamics of fires in wetlands of international importance in the Republic of Belarus for the period 2001–2020. The wetlands with a high total area of fires (the total area of fires is more than 10 000 hectares) includes five lands, five territories are characterized by a relatively average area of fires (the total area of fires is from 10 000 hectares to 1000 hectares), nine wetlands have a low area of fires (the total area of fires is less than 1000 hectares), seven Ramsar territories have fires for the period under review has not been identified (wetlands "Serevch", "Berezinsky Biosphere Reserve", "Dikoe Fen Mire", "Vygonooshchanskoe", "Drozhbitka – Svina", "Kotra", "Duleby Islands – Zaozerye"). The wetlands "Vileity", "Vydritsa", "Golubitskaya Pushcha", "Morochno", "Osveisky", "Podvelikiy Moh", "Poleskaya valley of the Bug River", "Svislochsko-Berezinsky" are characterized by damage to ecosystems by fires only in isolated years. The largest area of fires was identified on the territory of the wetland "State Landscape Zakaznik "Srednyaya Pripyat" (the total area of fires is 42 474 hectares).

During the study period, the largest area of fires in all wetlands was in 2002 – 46 222 hectares (fires were recorded on seven wetlands). No fires were detected in 2007. In the dynamics of fires at the wetlands, separate periods with the largest number of them can be distinguished: 2002–2004, 2011–2015 and 2018–2020. In 2020, fires were recorded only on five wetlands.

**Keywords:** wetlands; Ramsar territories; fires; wetlands "Republican landscape reserve "Srednyaya Pripyat".

**For citation.** Paliukhovich A. M., Grummo D. G., Zelenkovich N. A. Dynamics of fires in specially protected areas. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 79–87.

**Введение.** Деградация и уничтожение водно-болотных угодий (ВБУ), истощение ресурсов и прочие негативные изменения их состояния признаются одними из основных угроз экологической и национальной безопасности Республики Беларусь. Рациональное использование природно-ресурсного потенциала ВБУ, сохранение их биологического и ландшафтного разнообразия, содействие поддержанию экологического равновесия водно-болотных экологических систем относятся к числу жизненно важных национальных интересов Республики Беларусь в экологической сфере. Сохранение, восстановление и рациональное (устойчивое) использование гидрологических, биологических, химических и иных функций ВБУ выступает одной из приоритетных задач экологической политики и относится к одному из основных направлений внутренней политики Республики Беларусь [1, 2].

Нерациональное (неустойчивое) использование ресурсов ВБУ и, как следствие, дальнейшее их уничтожение и деградация свидетельствуют о необходимости проведения глубокого и комплексного исследования факторов деградации ВБУ [1].

Экологические риски деградации болот Беларуси связаны, главным образом, с проведением широкомасштабной осушительной мелиорации. Мелиоративное освоение заболоченных территорий привело к существенному сокращению площади самих болот. Известно, что осушение болотных комплексов приводит к изменению гидрологического режима территории, сведению естественной растительности, фрагментации ландшафтов, замене сложных природных лесоболотных комплексов на сельскохозяйственные угодья с коротким вегетационным периодом [1, 3].

Пожары являются одним из факторов, оказывающим негативное влияние на состояние природных экосистем. Причиной большинства природных пожаров является антропогенная деятельность.

Цель работы – выявить динамику повреждения пожарами ВБУ международного значения Республики Беларусь.

**Материалы и методы исследований.** Использованы сравнительно-географический, математический и геоинформационный методы. Картографические продукты созданы в QGIS.

Исходными данными послужила база данных истории пожаров для территории Беларуси за период 2001–2020 гг., созданная в Институте экспериментальной ботаники НАН Беларуси на основе анализа спутниковых продуктов для территории нашей страны. Для выявления пространственно-временных вариаций площадей участков, выгораемых в результате природных пожаров на территории Беларуси, выбран ежемесячный продукт MCD64A1 «Burned Area» 6-й коллекции (аппаратура MODIS, спутники Terra/Aqua). Тематический продукт, отражающий пространственное распределение значений Fire Recurrence Index, представлен на платформе облачных вычислений Google Earth Engine. Для обработки и анализа использованы данные не только за пожароопасный период (с апреля по октябрь), но и за весь год в целом [4].

**Результаты и их обсуждение.** Интенсивное влияние антропогенной деятельности сопровождается масштабными воздействиями на природные комплексы, ведет к неблагоприятным изменениям в окружающей природной среде и наносит экологический ущерб. Для ВБУ выявлены следующие экологические угрозы, связанные с антропогенным воздействием: наличие у границ угодья населенных пунктов; функционирование мелиоративных каналов; регулирование стока; сельскохозяйственное использование земель; сокращение сенокошения; коммуникационные и технические линии, дороги; неустойчивое лесопользование; выжигание растительности в весенний период; рекреационная деятельность; мусор и твердые бытовые отходы; радиоактивное загрязнение; засухи.

Одним из главных факторов деградации ВБУ являются пожары, распространению которых в первую очередь способствует нарушенный гидрологический режим.

В настоящее время в Беларуси насчитывается 26 территорий ВБУ международного значения, которые занимают 777 894,83 га, что составляет 3,7 % от территории страны. Из них четыре признаны частями трансграничных водно-болотных угодий международного значения: «Простырь – Припять – Стоход» и «Ольманские болота – Переброды» (Беларусь – Украина), «Котра – Чапляй» и «Вилейты – Адутишкис» (Беларусь – Литва).

Динамика пожаров на территории ВБУ международного значения представлена в табл. 1–4. Так, за период 2001–2020 гг. пожары наблюдались на 19 ВБУ. Для семи территорий пожары за рассматриваемый период не выявлены: ВБУ «Сервечь», «Березинский биосферный заповедник», «Болото Дикое», «Выгонощанская», «Дрожбитка – Свина», «Котра», «Острова Дулебы – Заозерье».

Для восьми ВБУ характерно повреждение экосистем пожарами только в единичные годы: ВБУ «Вилейты» – 97 га в 2004 г. (1 % от площади угодья), «Выдрица» – 1 га в 2017 г., ВБУ «Голубицкая пуща» – 28 га в 2018 г. (0,2 %), ВБУ «Морочно» – 417 га в 2015 г. (6,5 %), ВБУ «Освейский» – 99 га в 2004 г., ВБУ «Подвеликий Мох» – 277 га в 2016 г. (2,6 %), ВБУ «Полесская долина реки Буг» – 113 га в 2001 г., ВБУ «Свислочско-Березинский» – 3 га в 2014 г.

На остальных 11 ВБУ средняя доля поврежденных территорий составляет около 7 %, при этом наибольшая средняя доля повреждения у ВБУ «Ельня» (19 %), «Простырь» (14 %), «Старый Жаден» и «Пойма реки Ипуть» (9 %).

**Таблица 1. Пожары на водно-болотных угодьях, 2001–2005 гг.**

**Table 1. Wetland fires, 2001–2005**

ВБУ	2001 г.		2002 г.		2003 г.		2004 г.		2005 г.	
	Площадь, га	Доля, %								
Биологический заказник «Споровский»	—	—	—	—	921	4,8	2	0	—	—
Вилейты	—	—	—	—	—	—	97	1	—	—
Выдрица	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голубицкая пуща	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Долина реки Днепр	—	—	44	0,1	70	0,2	—	—	31	0,1
Ельня	—	—	14 263	56,4	—	—	—	—	—	—
Заказник «Ольманские болота»	—	—	13 614	14,4	2198	2,3	—	—	—	—
Званец	—	—	—	—	899	5,5	608	4	—	—
Козъянский	—	—	—	—	—	—	27	0	—	—
Морочно	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Национальный парк «Припятский»	—	—	4371	4,9	2067	2,3	—	—	252	0,3
Освейский	—	—	—	—	—	—	99	0	—	—
Подвелький Мох	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пойма реки Ипуть	—	—	—	—	60	1,7	401	11	102	2,9
Полесская долина реки Буг	113	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—
Простырь	—	—	2429	25,5	—	—	296	3	—	—
Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять»	—	—	7237	7,8	3697	4,0	302	0	88	0,1
Свислочско-Березинский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Старый Жаден	—	—	4264	25,0	499	2,9	—	—	—	—

**Таблица 2. Пожары на водно-болотных угодьях, 2006–2011 гг.**

**Table 2. Wetland fires, 2006–2011**

ВБУ	2006 г.		2008 г.		2009 г.		2010 г.		2011 г.	
	Площадь, га	Доля, %								
Национальный парк «Припятский»	289	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—
Осовейский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Подвеликий Мох	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пойма реки Ипуть	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Полесская долина реки Буг	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Простырь	—	—	—	—	—	—	98	1,0	517	5,4
Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять»	—	—	—	—	2	0,0	—	—	942	1,0
Свислочско-Березинский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Старый Жаден	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

**Таблица 3. Пожары на водно-болотных угодьях, 2012–2016 гг.****Table 3: Wetland fires, 2012–2016**

ВБУ	2012 г.		2013 г.		2014 г.		2015 г.		2016 г.	
	Площадь, га	Доля, %								
Биологический заказник «Споровский»	3372	17,4	—	—	15	0,1	—	—	—	—
Вилейты	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Выдрица	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голубицкая пуша	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Долина реки Днепр	—	—	224	0,8	52	0,2	95	0,3	—	—
Ельня	—	—	—	—	—	—	68	0,3	—	—
Заказник «Ольманские болота»	20	0,0	—	—	89	0,1	13 623	14,5	—	—
Званец	872	5,4	—	—	2208	13,6	—	—	—	—
Козьянский	—	—	—	—	27	0,1	—	—	33	0,1
Морочно	—	—	—	—	—	—	417	6,5	—	—
Национальный парк «Припятский»	1269	1,4	—	—	75	0,1	2105	2,4	—	—
Осовейский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Подвеликий Мох	—	—	—	—	—	—	—	—	277	2,6
Пойма реки Ипуть	—	—	—	—	970	27,7	88	2,5	—	—
Полесская долина реки Буг	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Простырь	41	0,4	—	—	1862	19,5	396	4,1	—	—
Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять»	6339	6,8	—	—	7534	8,1	2692	2,9	44	0,0
Свислочско-Березинский	—	—	—	—	3	0,0	—	—	—	—
Старый Жаден	—	—	—	—	—	—	44	0,3	—	—

**Таблица 4. Пожары на водно-болотных угодьях, 2017–2020 гг.****Table 4: Wetland fires, 2017–2020**

ВБУ	2017 г.		2018 г.		2019 г.		2020 г.	
	Площадь, га	Доля, %						
Биологический заказник «Споровский»	–	–	–	–	685	3,5	4221	21,8
Вилейты	–	–	–	–	–	–	–	–
Выдрица	1	0,0	–	–	–	–	–	–
Голубицкая пуща	–	–	28	0,2	–	–	–	–
Долина реки Днепр	15	0,1	–	–	476	1,6	13	0,0
Ельня	–	–	–	–	–	–	–	–
Заказник «Ольманские болота»	–	–	72	0,1	4109	4,4	–	–
Званец	–	–	–	–	–	–	–	–
Козьянский	–	–	–	–	24	0,1	–	–
Морочно	–	–	–	–	–	–	–	–
Национальный парк «Припятский»	–	–	–	–	53	0,1	1105	1,2
Освейский	–	–	–	–	–	–	–	–
Подвеликий Мох	–	–	–	–	–	–	–	–
Пойма реки Ипуть	–	–	–	–	–	–	–	–
Полесская долина реки Буг	–	–	–	–	–	–	–	–
Простырь	–	–	2583	27,1	2507	26,3	2168	22,7
Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять»	–	–	–	–	697	0,7	12 854	13,8
Свислочско-Березинский	–	–	–	–	–	–	–	–
Старый Жаден	–	–	–	–	–	–	–	–

Для территории ВБУ «Биологический заказник «Споровский» пожары наблюдались в 2003, 2012, 2014, 2019, 2020 г. Наибольшая доля была повреждена в 2020 г. и составила 22 % (4221 га), в 2012 г. – 17 % (3372 га). Практически каждый год (2002, 2003, 2005, 2006, 2009, 2011, 2013, 2014, 2015, 2017, 2019, 2020 г.) фиксировали пожары на ВБУ «Долина реки Днепр», но они имеют в основном незначительные зоны распространения: наибольшая доля – 2 % (476 га) – в 2019 г. На территории ВБУ «Ельня» пожары зафиксированы только для трех лет: 2002, 2010 и 2015. При этом наибольшая площадь повреждений отмечена в 2002 г. – 14 263, или 56 %.

Для ВБУ «Заказник «Ольманские болота» наибольшая площадь повреждений огнем была характерна в 2015 г. Это 13 623, или 15 % от площади угодья. Сопоставимая площадь пожаров была в 2002 г. Тогда было повреждено огнем 13 614 га (14 % угодья). Незначительные площади повреждений были в 2003 г. (2198 га, или 2,3 %), 2008 г. (119 га, или менее 1 %), 2011 г. (16 га, или менее 1 %), 2012 г. (20 га, или менее 1 %), 2014 г. (89 га, или менее 1 %), 2018 г. (72 га, или менее 1 %), 2019 г. (4109 га, или 4 %). Для территории ВБУ «Званец» наибольшее угнетение экосистем огнем было зафиксировано в 2014 г., что оценено в 2208 га, или 14 % от площади угодья. Соотносимые по площади пожары были в 2003 г. (899 га, или 6 %); 2004 г. (608 га, или 4 %), 2012 г. (872 га, или 5 % соответственно).

На территории ВБУ «Козьянский» в 2004, 2006, 2010, 2011, 2014, 2016, 2019 г. пожаром повреждено менее 1 % угодья. При этом общая площадь пожаров составляет 275 га. На территории ВБУ «Национальный парк «Припятский» общая площадь составляет 11 599 га. Наибольшее распространение пожары получили в 2002 г.: 4371 га, или 5 %. Соотносимы площади были в 2003 г. (2067 га, или 2 %), 2012 г. (1269 га, или 1 %), 2015 (2105 га, или 2 %), в 2020 г. (1105 га, или 1 %). В 2005, 2006, 2014, 2019 г. доля распространения пожаров составила менее 1 % от площади угодья.

Для ВБУ «Пойма реки Ипуть» наибольшая доля распространения характерна в 2014 г. (970 га, или 28 %). В 2003 г. было повреждено 60 га, или 2 %; в 2004 г. – 401 га, или 11 %; в 2005 г. – 102 га, или 3 %; в 2015 г. – 88 га, или 3 %.

Общая площадь пожаров для ВБУ «Простырь» составила 13 032 га. За рассматриваемый период пожары наблюдались в десяти годах. Наибольшие площади пожаров отмечены в 2002 г. – 2429 га (26 %), в 2014 г. – 1862 га (20 %), в 2018 г. – 2583 га (27 %), в 2019 г. – 2507 га (26 %), в 2020 г. – 2168 га (23 %). Значительно ниже были доли поражений в 2004 г. (296 га, или 3 %), 2010 г. (98 га, или 1 %), 2011 г. (517 га, или 5 %), 2012 г. (41 га, или менее 1 %), 2015 г. (396 га, или 4 %) гг. На территории ВБУ «Старый Жаден» наибольшая площадь пожаров была в 2003 г. и составила 4264 га, или 25 %. К 2020 г. они наблюдались еще два раза: в 2003 г. (499 га, или 3 %) и в 2015 г. (44 га, или менее 1 % площади угодья).

В целом, наибольшая площадь пожаров для периода с 2001 по 2020 г. характерна для 2002 г. (46 222 га). Тогда пожары были зафиксированы на семи ВБУ: «Долина реки Днепр», «Ельня», «Заказник «Ольманские болота», «Национальный парк «Припятский», «Простырь», «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять», «Старый Жаден». В 2007 г. не выявлено пожаров вовсе. В динамике пожаров на ВБУ можно выделить отдельные периоды с их наибольшим количеством. Это 2002–2004, 2011–2015 и 2018–2020 гг. (рис. 1). В 2020 г. пожары зафиксированы на пяти ВБУ: «Биологический заказник «Споровский», «Долина реки Днепр», «Национальный парк «Припятский», «Простырь», «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять».

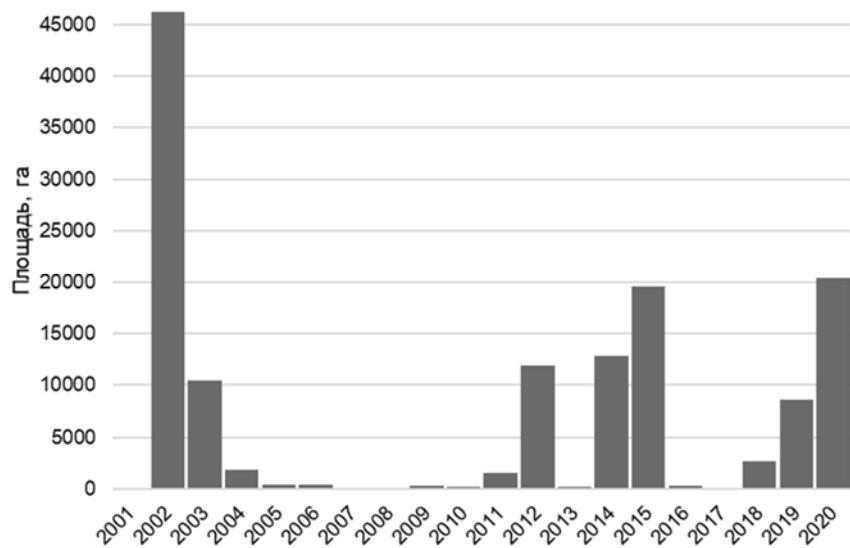


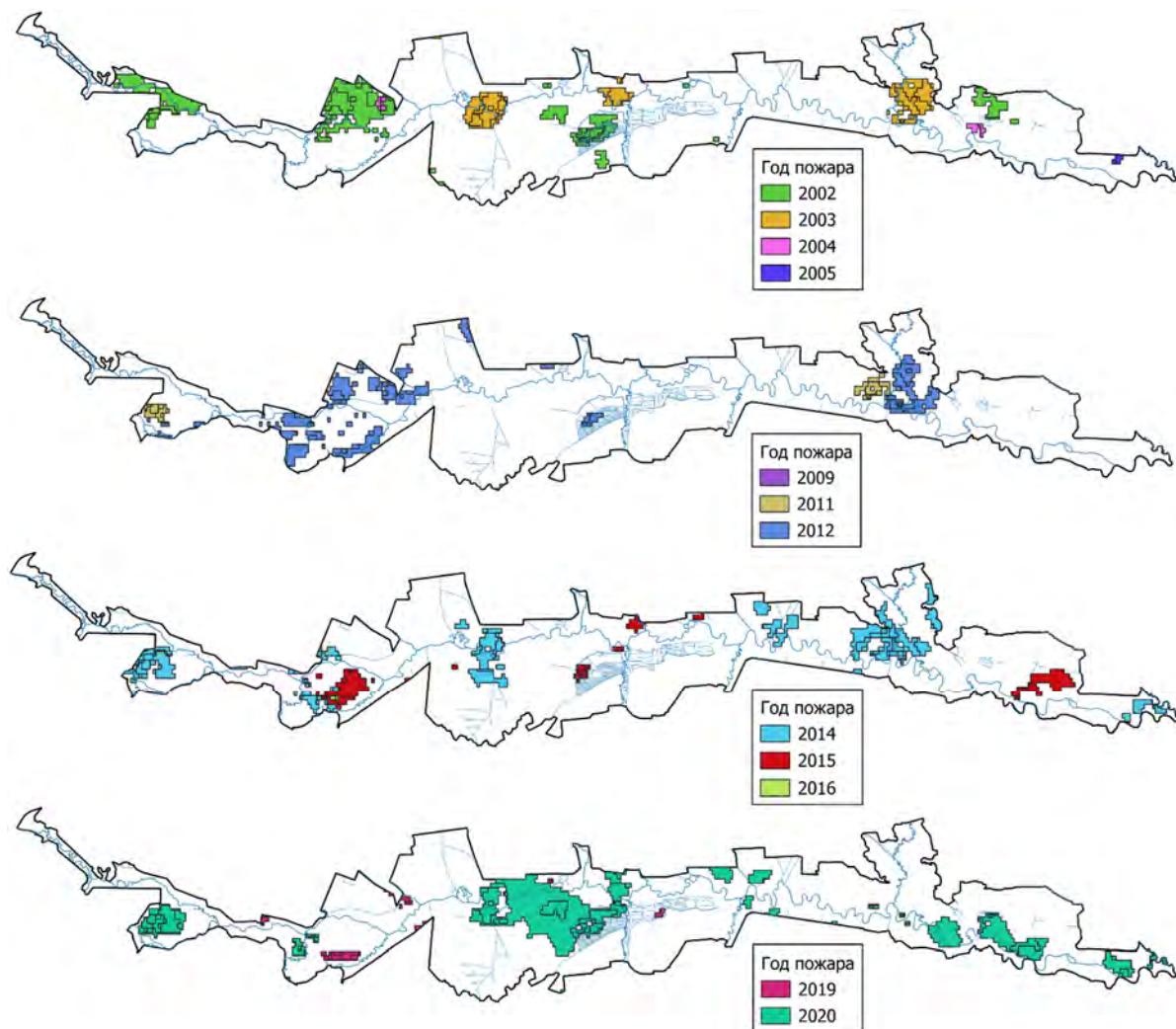
Рис. 1. Динамика площадей пожаров для водно-болотных угодий международного значения, 2001–2020 гг.

Fig. 1. Dynamics of fire areas for wetlands of international importance, 2001–2020

Наиболее пострадала от пожаров территория ВБУ «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять». Общая их площадь составила 42 474 га. Они зафиксированы здесь для 12 лет в период с 2001 по 2020 г. Главным образом пожары получили распространение в восточной и западной части ВБУ (рис. 2). Наибольшую площадь они достигли в 2020 г.: 12 854 га, или 18 % от площади угодья. Большие площади пожаров были в 2002 г. (7237 га, или 8 %), в 2012 г. (6339 га, или 7 %) и в 2014 г. (7534 га, или 8 %). Меньшие площади пожаров наблюдались в 2003, 2004, 2005, 2009, 2011, 2015, 2016, 2019 г.

К факторам негативного влияния на состояние ВБУ «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять» относятся гидротехническое строительство, загрязнение воды, неконтролируемое выжигание растительности, вырубка лесов, выпас скота, увеличение закустаренности [5].

Для минимизации влияния негативных факторов на территории ВБУ предложены реконструкция существующих гидромелиоративных объектов с применением экологически ориентированных методов гидротехнической мелиорации и гидротехнического строительства; вывод отдельных участков ранее осущеных земель из сельскохозяйственного использования и их повторное заболачивание; обвалование животноводческих комплексов, своевременная и безопасная утилизация отходов; поощрение традиционных методов хозяйствования на сенокосах и пастбищах, например посредством субсидий; запрет вспашки естественных лугов; запрет работ по спрямлению русла р. Припять и ее притоков [5, 6].



**Рис. 2. Распространение пожаров на территории ВБУ «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять»**

**Fig. 2. Distribution of fires in the territory of the wetland "Republican landscape reserve "Srednyaya Pripyat"**

Проекты по восстановлению экосистем ВБУ обычно направлены на восстановление гидрологического режима, что приводит к восстановлению разнообразия и изобилия местной растительности и фауны. Тем не менее воссоздания гидрологических условий может быть недостаточно, чтобы вызвать изменения, которые помогут повернуть вспять деградацию ВБУ [7].

Еще одним решением, направленным на сохранение экосистем ВБУ, является управляемое выжигание сухой растительности. У него есть целый ряд ограничений, которые касаются погодных условий, скорости ветра, толщины снежного покрова и т. д. Между контролируемым выжиганием и самодеятельными весенними палами существует разница. Для того чтобы применить данный метод, необходима большая подготовительная работа, включая научное обоснование, согласование с Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, землепользователями и т. д. Само контролируемое выжигание осуществляется в присутствии представителей инспекции по охране животного и растительного мира. Контролируемое выжигание проводили на небольших участках на территории ВБУ «Биологический заказник «Споровский» и «Званец». В комплексе с кошением оно позволило очистить от тростника и кустарников значительную территорию [4, 6, 7].

Для территорий ВБУ «Освейский», «Ельня», «Морочно» «Званец», «Сервечь» проведено восстановление гидрологического режима. Построен ряд водорегулирующих сооружений, использование которых не допускает избыточного сброса воды с угодий в окружающие каналы. Это позволяет обеспечить ВБУ водой и избежать катастрофических пожаров. При этом на территориях ВБУ «Званец», «Сервечь» и «Биологический заказник «Споровский» проводили контролируемые палы, а также регулярное кошение для отчуждения биомассы и вырубку древесно-кустарниковой растительности [8, 9].

### **Выводы.**

1. К ВБУ с высокой общей площадью пожаров за период 2001–2020 гг. относится пять угодий: «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять», «Заказник «Ольманские болота», «Ельня», «Простырь», «Национальный парк «Припятский» (общая площадь пожаров более 10 000 га). Для пяти территорий характерна относительно средняя площадь пожаров (общая площадь пожаров от 10 000 га до 1000 га): ВБУ «Биологический заказник «Споровский», «Старый Жаден», «Званец», «Пойма реки Ипуть», «Долина реки Днепр». На девяти ВБУ площадь пожаров низкая (общая площадь пожаров менее 1000 га): ВБУ «Морочно», «Подвеликий Мох», «Козьянский», «Полесская долина реки Буг», «Освейский», «Вилейты», «Голубицкая пуша», «Свислочско-Березинский», «Выдрица». На семи Рамсарских территориях пожары за рассматриваемый период не выявлены: ВБУ «Сервечь», «Березинский биосферный заповедник», «Болото Дикое», «Выгонощанское», «Дрежбйтка – Свина», «Котра», «Острова Дулебы – Заозерье».

2. В 2002 г. пожары были на территории ВБУ «Долина реки Днепр», «Ельня», «Заказник «Ольманские болота», «Национальный парк «Припятский», «Простырь», «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять», «Старый Жаден» и их площадь стала максимальной за рассматриваемый период – 46 222 га. В динамике пожаров на ВБУ можно выделить отдельные периоды с их наибольшим количеством: 2002–2004, 2011–2015 и 2018–2020 гг.

3. Для восьми ВБУ характерно повреждение экосистем пожарами только в единичные годы. На одиннадцати ВБУ средняя доля поврежденных территорий составляет около 7 %, при этом наибольшее повреждение у ВБУ «Ельня», «Простырь», «Старый Жаден», «Пойма реки Ипуть».

4. Наибольшая площадь пожаров характерна для ВБУ «Республиканский ландшафтный заказник «Средняя Припять» – 42 474 га. Они получили распространение в восточной и западной частях ВБУ.

### **Список использованных источников**

1. Речиц, Е. В. Теоретические основы правовой охраны водно-болотных угодий / Е. В. Речиц // Труд. Профсоюзы. Общество. – 2016. – № 4 (54). – С. 82–86.
2. Белькова, Т. А. Обзор эколого-экономических последствий торфяных пожаров / Т. А. Белькова, В. А. Перминов, Н. А. Алексеев // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – № 3. – С. 35–44.
3. Брилевский, М. Н. Особенности пространственного проявления экологических рисков деградации болот Белорусского Полесья / М. Н. Брилевский, В. А. Бакарасов, Н. В. Гагина // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 23–25 апр. 2014 г. : в 4 ч. / Мин-во образования Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т, фак-т инженерных систем и экологии ; под ред. А. А. Волчека [и др.]. – Брест, 2014. – Ч. 2. – С. 83–88.
4. Груммо, Д. Г. Ретроспективный анализ динамики природных пожаров на территории Беларуси на основе данных дистанционного зондирования / Д. Г. Груммо // Природные ресурсы. – 2022. – № 1. – С. 112–125.
5. Выполнение первой стадии подготовки планов управления заказниками «Средняя Припять» и «Простырь» : отчет о НИР / Нац. акад. наук Беларусь, Ин-т зоологии ; рук. М. Е. Никифоров. – Минск, 2005. – 142 с.
6. Тэрыторыі, важныя для птушак у Беларусі / пад агул. рэд. С. В. Левага. – Мінск : РЫФТУР ПРЫНТ, 2015. – 152 с.
7. Rehydration of degraded wetlands: Understanding drivers of vegetation community trajectories / A. Nocentini [et al.] // Ecosphere. – 2024. – T. 15, №. 4. – Р. 1–25. doi:10.1002/ecs2.4813
8. Рамсарские территории Беларусь: «Болото Дикое» / Д. Г. Груммо [и др.] ; под ред. Д. Г. Груммо. – Минск : Колорград, 2020. – 260 с.
9. Оценка и прогноз пожароопасной ситуации при оптимизации гидрологического режима верхового болота «Ельня» (Беларусь) / Д. Г. Груммо [и др.] // Социально-экологические технологии. – 2016. – № 4. – С. 7–19.

### **References**

1. Rechic E. V. *Teoreticheskie osnovy pravovoj ohrany vodno-bolotnyh ugodiij* [Theoretical foundations of the legal protection of wetlands]. *Trud. Profsojuzy. Obshhestvo = Labour. Trade unions. Society*, 2016, no. 4 (54), pp. 82–86. (in Russian)
2. Bel'kova T. A., Perminov V. A., Alekseev N. A. *Obzor jekologo-jekonomicheskih posledstvij torfjaryh pozharov* [Review of the ecological and economic consequences of peat fires]. *XXI vek. Tehnosfernaja bezopasnost' = XXI century. Technosphere safety*, 2016, no. 3, pp. 35–44. (in Russian)
3. Brilevskij M. N., Bakarasov V. A., Gagina N. V. *Osobennosti prostranstvennogo projavlenija jekologicheskikh riskov degradacii bolot Beloruskogo Poles'ja* [Features of spatial manifestation of environmental risks of degradation of swamps of the Belarusian Polesie]. *Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya. Sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. Int. sci. and pract. conf. 'Actual scientific, technical and environmental problems of habitat conservation']. Ed. A. A. Volchek [et al.]. Brest, 2014, part 2, pp. 83–88. (in Russian)

4. Grummo D. G. *Retrospektivnyj analiz dinamiki prirodnyh pozharov na territorii Belarusi na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya* [Retrospective analysis of the dynamics of wildfires on the territory of Belarus based on remote sensing data]. *Prirodnye Resursy = Natural resources*, 2022, no. 1, pp. 112–125. (in Russian)
5. *Vypolnenie pervoj stadii podgotovki planov upravlenija zakaznikami "Srednjaja Pripjat' i "Prostyr"*. *Otchet o NIR* [Implementation of the first stage of preparation of management plans for the reserves "Srednaya Pripyat" and "Prostyr"]. Research report. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Zoology. Hand. M. E. Nikiforov. Minsk, 2005, 142 p. (in Russian)
6. *Tjerytoryi, vazhnyja dlja ptushak u Belarusi* [The territories important for birds in Belarus]. Ed. S. V. Levaga. Minsk, RIFTUR PRINT Publ., 2015, 152 p. (in Belarusian)
7. Nocentini A., e. a. Rehydration of degraded wetlands: Understanding drivers of vegetation community trajectories. *Ecosphere*, 2024, vol. 15, no. 4, pp. 1–25. doi:10.1002/ecs2.4813
8. Grummo D. G., e. a. *Ramsarskie territorii Belarusi: "Boloto Dikoe"* [Ramsar territories of Belarus: "Wild Swamp"]. Ed. D. G. Grummo. Minsk, Colorgrad Publ., 2020, 260 p. (in Russian)
9. Grummo D. G., Zelenkevich N. A., Sozinov O. V., Moiseychik E. V. *Ocenka i prognoz pozharoopasnoj situacii pri optimizacii gidrologicheskogo rezhima verhovogo bolota "El'nja" (Belarus)* [Assessment and forecast of a fire-hazardous situation in optimizing the hydrological regime of the Yelnya upland swamp (Belarus)]. *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii = Socio-environmental technologies*, 2016, no. 4, pp. 7–19. (in Russian)

#### Информация об авторах

*Полюхович Андрей Николаевич* – преподаватель, кафедра физической географии мира и образовательных технологий, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: nadkimar@gmail.com

*Груммо Дмитрий Геннадьевич* – кандидат биологических наук, доцент, директор, Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь); доцент кафедры физической географии мира и образовательных технологий, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: zm.hrumo@gmail.com

*Зеленкевич Наталья Алексеевна* – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт экспериментальной ботаники НАН Беларусь (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь). E-mail: zeliankevich\_nat@mail.ru

#### Information about the authors

*Andrei M. Paliukhovich* – Lecturer, Department of Physical Geography of the World and Educational Technologies, Belarusian State University (Leningradskaya Str., 16, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: nadkimar@gmail.com

*Dmitry G. Grummo* – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Director, Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (Akademicheskaya str., 27, 220072, Minsk, Belarus); Associate Professor of the Department of Physical Geography of the World and Educational Technologies, Belarusian State University (Leningradskaya Str., 16, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: zm.hrumo@gmail.com

*Natalia A. Zelenkevich* – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (Akademicheskaya Str., 27, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: zeliankevich\_nat@mail.ru

## ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-88-93>

УДК 551.2+551.3(476.1/.4/.6)

Поступила в редакцию 17.09.2024

Received 17.09.2024

### РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ БЕЛАРУСИ ПО ВЕРОЯТНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А. В. Матвеев, Е. А. Кухарик

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** На территории Центральной Беларуси довольно разнообразно и неравномерно проявляются современные геологические процессы. С использованием построенных ранее схем эндогенных, экзогенных и техногенных геологических процессов для территории региона была выполнена оценка вероятности их развития. Анализировались проявления плоскостной эрозии, овражной эрозии, гравитационных, техногенных процессов, карста, суффозии, дефляции, подтопления, заболачивания, болотообразования, геодинамических процессов в зонах активных разломов, космо- и тополинеаментов, характеристики сейсмичности, глубины залегания первого от земной поверхности горизонта подземных вод, химического загрязнения первого от поверхности горизонта подземных вод и покровных отложений. Установленная вероятность развития современной геодинамики (в баллах) варьирует в интервале от 5–7 до 30 и более. Районирование территории по этому показателю позволило выделить площади с умеренной (менее 10 баллов), средней (10,1–15,0), повышенной (15,1–20,0), высокой (20,1–25,0) и весьма высокой (более 25,0) вероятностью развития современных геологических процессов. Выявлена определенная взаимосвязь рассматриваемого показателя с тектоническими и геоморфологическими особенностями региона.

**Ключевые слова:** современные геологические процессы; районирование; вероятность проявления современной геодинамики; Центральная Беларусь.

**Для цитирования.** Матвеев А. В., Кухарик Е. А. Районирование территории Центральной Беларуси по вероятности проявления современных геологических процессов // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 88–93.

### ZONING OF THE CENTRAL BELARUS AREA BY THE PROBABILITY OF MODERN GEOLOGICAL PROCESSES MANIFESTATION

A. V. Matveyev, E. A. Kukharik

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

**Abstract.** Modern geological processes in the territory of Central Belarus are manifested quite diversely and unevenly. The probability of their development, estimated in conventional points, varies in the range from 5–7 to 30 and more. Zoning of the territory by this indicator let to identify areas with moderate (less than 10 points), average (10.1–15.0), increased (15.1–20.0), high (20.1–25.0) and very high (more than 25 points) probability of modern geological processes development. A certain relationship between the considered indicator and the tectonic and geomorphological features of the region has been established.

**Keywords:** modern geological processes; zoning; probability of modern geodynamics manifestation; Central Belarus.

**For citation.** Matveyev A. V., Kukharik E. A. Zoning of the Central Belarus area by the probability of modern geological processes manifestation. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 88–93.

**Введение.** Геоэкологическая обстановка в любом регионе в определенной степени зависит от проявления современных геологических процессов. Поэтому весьма актуальными являются исследования особенностей развития этих процессов и разработка мероприятий по ограничению их неблагоприятных последствий. В процессе реализации подобных работ очень важна оценка вероятности развития отдельных видов современной геодинамики, что позволяет выделить территории, на которых чаще всего ожидаются подобные проявления. Это требует первоочередного выполнения в их пределах мероприятий по ограничению неблагоприятных последствий активизации геологических процессов. Исследования подобного профиля проводятся во многих странах, в том числе в России и Беларуси [1–6]. Такими разработками занимаются и авторы настоящей статьи в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Оценка степени опасности геологической среды для жизнедеятельности населения на территории Центральной Беларуси на основании исследований направленности развития ландшафтов, геодинамических, гидрогеологических и геохимических условий» государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» (2021–2025 гг.).

Перед изложением полученных результатов следует отметить, что само понятие «вероятность проявления» не всегда трактуется однозначно. Нередко оно отождествляется с риском, иногда с опасностью, ожиданием опасности и возможностью ее реализации [7]. В связи с этим необходимо подчеркнуть, что в представленной статье под понятием «вероятность» понимается ожидание проявления различных видов современной геодинамики. Поэтому, чем большее количество современных геологических процессов регистрируется на определенной территории и чем чаще повторяемость их развития, тем выше вероятность проявления. На таких принципах и была проведена оценка развития современных геологических процессов на территории Центральной Беларуси и построена соответствующая схема.

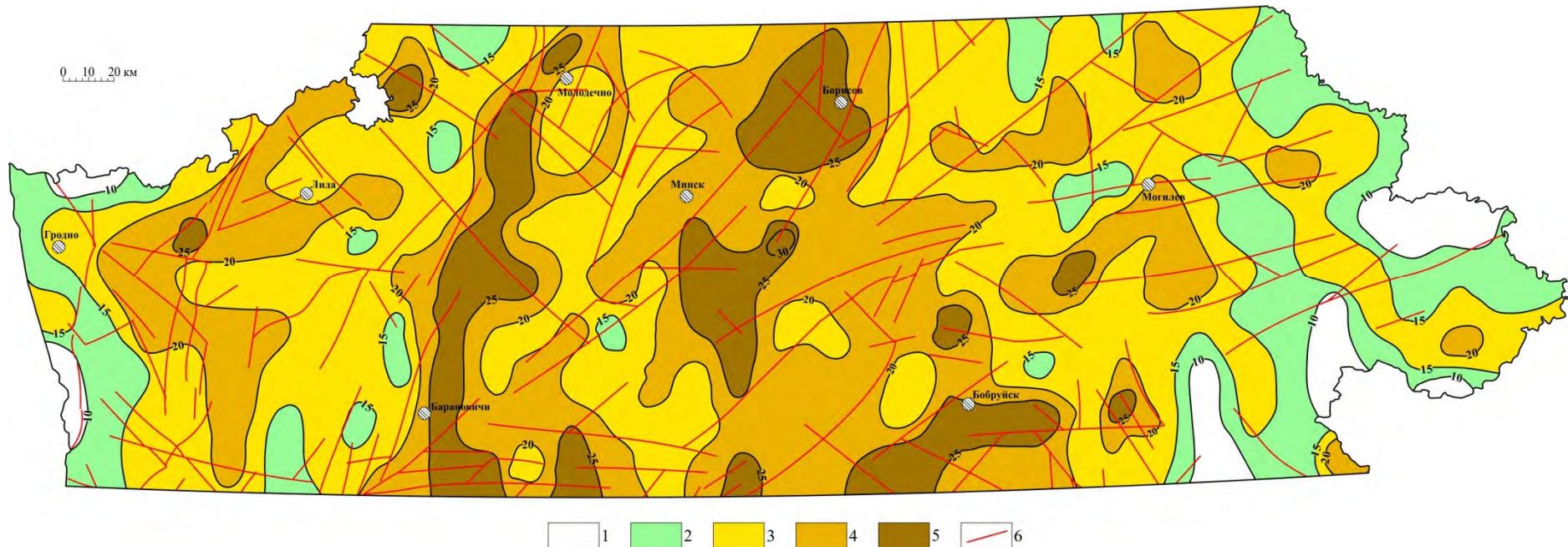
**Материалы и методика исследования.** Основным источником фактического материала для оценки вероятности развития современных геологических процессов на территории Центральной Беларуси послужили составленные при участии и под руководством авторов настоящей статьи схемы эндогенных, экзогенных и техногенных процессов [8–13], а также результаты некоторых ранее выполненных исследований и построений [14, 15]. Эти схемы были разбиты на 330 квадратов со средними размерами 15 км × 15 км. Затем в квадратах подсчитывали количество видов возможного проявления современных геологических процессов. После этого в условных баллах оценивали повторяемость их проявления: примерно раз в столетие и реже – 1, раз в несколько лет – 2, сезонное проявление – 3 и постоянное – 4.

Для построения схемы районирования учитывали такие современные геологические процессы и характеристики, как плоскостная водная эрозия, овражная эрозия, гравитационные и техногенные процессы, карст, суффозия, дефляция, подтопление, заболачивание, болотообразование, геодинамические процессы в зонах активных разломов, космо- и тополинеаментов, сейсмичность, глубина залегания первого от земной поверхности горизонта подземных вод, химическое загрязнение первого от поверхности горизонта подземных вод и покровных отложений.

Повторяемость современных геологических процессов оценивали, используя такие величины, как сейсмичность – 1–2 балла (в зависимости от интенсивности); плоскостная эрозия – 3; овражная эрозия, гравитационные процессы, суффозия, дефляция, карст, подтопление – 2–3 (в зависимости от интенсивности); заболачивание, болотообразование, техногенные, геодинамические процессы в зонах активных разломов, космо- и тополинеаментов, глубина залегания подземных вод, геохимические аномалии – 4 балла.

Приведенные величины повторяемости как раз и соответствуют вероятности проявления каждого геологического процесса в пределах квадратов, а их сумма в каждом квадрате является оценкой вероятности развития современной геодинамики в целом. Эту величину относили к центру квадрата, а затем проводили изолинии по территории всего региона. По особенностям распределения изолиний выделили площади с умеренной (менее 10 баллов), средней (10,1–15,0), повышенной (15,1–20,0), высокой (20,1–25,0) и весьма высокой (более 25 баллов) вероятностью развития рассматриваемых процессов, в том числе в зонах активных линейных разрывных структур.

**Обсуждение полученных результатов.** Судя по построенной схеме (см. рисунок), вероятность проявления современных геологических процессов на территории Центральной Беларуси варьирует от 5–7 до 30 баллов и более. Характер распределения этих значений по территории изученного региона свидетельствует о том, что максимальные их величины в основном тяготеют к его центральной части: примерно между субмеридиональными линиями, проходящими через населенные пункты г. п. Радунь – г. п. Вороново – г. Мосты – г. п. Зельва и г. Шклов – г. Могилёв – г. Жлобин. На территориях между этими линиями преобладают значения вероятности 20–25 баллов, хотя на отдельных площадях они могут возрастать до 30 баллов или снижаться до 15–20 баллов.



**Районирование территории Центральной Беларуси по вероятности проявления современных геологических процессов.**

Степень вероятности (преобладающая оценка в баллах):

- 1 – умеренная (менее 10); 2 – средняя (10,1–15,0); 3 – повышенная (15,1–20,0); 4 – высокая (20,1–25,0);
- 5 – весьма высокая (более 25); 6 – весьма высокая в зонах активных разломов (более 25)

**Zoning of the Central Belarus area by the probability of modern geological processes manifestation.**

Probability level (predominant assessment in points):

- 1 – moderate (less than 10); 2 – average (10.1–15.0); 3 – increased (15.1–20.0); 4 – high (20.1–25.0);
- 5 – very high (more than 25); 6 – very high in zones of active faults (more than 25)

Наиболее низкие значения рассматриваемого показателя составляют 10–15 баллов и ниже. Они приурочены к крайним западной и восточной частям Центральной Беларуси. В распределении анализируемых значений вероятности выявлена определенная субмеридиональная зональность двух типов: первая выражена в западной части региона полосами шириной 25–50 км (местами до 80 км), пересекающими весь регион с преобладанием значений 20–25 баллов и более и 15–20 баллов, вторая проявляется не столь широкой полосчатостью, соответствует речным долинам или направлениям стока талых ледниковых вод.

Максимальные значения вероятности развития современных геологических процессов, тяготеющие к центральной части Центральной Беларуси, в самом общем виде совпадают с территорией Белорусской антеклизы, а минимальные значения в западной части региона тяготеют к Ивацевичскому и Мазурскому погребенным выступам и склонам Подлясско-Брестской впадины, в восточной – к склонам Оршанской впадины. Однако, скорее всего, эта приуроченность обусловлена не столько тектоническими особенностями региона, сколько строением рельефа земной поверхности, которое в определенной степени коррелируется с тектоническими структурами [16].

Корреляция же показателей вероятности развития процессов со строением земной поверхности является более однозначной и генетически связанной. Так, максимальные значения показателя вероятности тяготеют к наиболее пересеченным комплексам краевого ледникового рельефа Центрально-Белорусских возвышенностей и гряд, а пониженные величины – к выпуклым водно-ледниковым равнинам. Наибольшие значения вероятности (25–30 баллов и более) чаще всего связаны с участками, на которых сочетаются (обычно небольшие по площади) разнообразные и контрастные формы и типы рельефа (краевые ледниковые гряды и холмы, фрагменты низин и равнин флювиогляциального, озерно-аллювиального, моренного генезиса, долины водотоков, различные техногенные формы и др.). Причем эти участки встречаются почти по всей территории региона (восточнее и юго-восточнее г. Рогачёва, в районе г. Чечерска, западнее г. Червоня, юго-западнее г. Старые Дороги, северо-западнее г. Молодечно и т. д.). Следует также отметить, что примерно такие же небольшие по площади участки пониженных до 15 баллов и ниже величин вероятности проявления современной геодинамики встречаются в центральной части региона. Обычно им соответствует однородный выпуклый рельеф флювиогляциальных или моренных равнин, иногда – выпукленные склоны краевых ледниковых образований.

### **Выводы.**

1. На территории Центральной Беларуси довольно разнообразно и с неодинаковой повторяемостью проявляются современные геологические процессы. Выполнено районирование по вероятности их развития, которая в условных единицах варьирует от 5–7 до 30 баллов и более. Выделены таксоны с умеренной (менее 10 баллов), средней (10,1–15,0), повышенной (15,1–20,0), высокой (20,1–25,0), весьма высокой (более 25,0) и весьма высокой в зонах активных разломов (более 25,0 баллов) степенью вероятности проявления современной геодинамики.

2. Выявлена в самом общем виде корреляция распределения значений вероятности развития современной геодинамики и особенностей рельефа земной поверхности.

3. Выполненное районирование территории Центральной Беларуси может быть использовано для организации мониторинга проявлений современных геологических процессов и ранжирования территории по очередности проведения мероприятий по ограничению неблагоприятных последствий их развития.

### **Список использованных источников**

1. Commission staff working paper «Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management» : Brussels, 21.12.2010, SEC(2010) 1626 final [Electronic resource]. – Mode of access: [https://ec.europa.eu/echo/files/about/COMM\\_PDF\\_SEC\\_2010\\_1626\\_F\\_staff\\_working\\_document\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/echo/files/about/COMM_PDF_SEC_2010_1626_F_staff_working_document_en.pdf). – Date of access: 17.09.2024.
2. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков : учеб. пособие / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. – М. : Академия, 2008. – 368 с.
3. Проблемы снижения природных опасностей и рисков : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «ГЕОРИСК – 2012» : в 2 т. / отв. ред. Н. Г. Мавлянова. – М. : РУДН, 2012. – Т. 2. – 311 с.
4. Геоэкологические исследования природных комплексов и геосистем : учеб.-метод. пособие / М. Г. Ясовеев [и др.]. – Минск : БГПУ, 2008. – 247 с.
5. Инженерная геология Беларуси : в 3 ч. / А. Н. Галкин [и др.] ; под ред. В. А. Королева. – Витебск : ВГУ, 2016–2018. – Ч. 2 : Инженерная геодинамика Беларуси. – 2017. – 452 с.
6. Осипов, В. И. Природные катастрофы в центре внимания ученых / В. И. Осипов // Вестник Российской академии наук. – 1995. – Т. 65, № 6. – С. 483–495.

7. Палиенко, В. П. К проблеме неогеодинамического риска / В. П. Палиенко // Новые географические знания и направления исследований. – Киев : Академпериодика, 2006. – С. 232–241.
8. Кухарик, Е. А. Особенности проявления современных водно-эррозионных процессов на территории Центральной Беларуси / Е. А. Кухарик, А. В. Матвеев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 6. – С. 613–621. doi:10.29235/1561-8323-2022-66-6-613-621
9. Кухарик, Е. А. Развитие процессов биогенного седименто- и морфогенеза на территории Центральной Беларуси / Е. А. Кухарик // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 185–194. doi:10.47612/2079-3928-2022-2-185-194
10. Кухарик, Е. А. Особенности проявления современных карстовых и суффозионных процессов на территории Центральной Беларуси / Е. А. Кухарик // Літасфера. – 2022. – № 2 (57). – С. 94–100.
11. Матвеев, А. В. Современные эндогенные геологические процессы на территории Центральной Беларуси / А. В. Матвеев, Е. А. Кухарик // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 2. – С. 156–163. doi:10.29235/1561-8323-2024-68-2-156-163
12. Кухарик, Е. А. Оценка трансформации земной поверхности территории Центральной Беларуси в результате железнодорожного строительства / Е. А. Кухарик, А. С. Глаз // Молодежь в науке – 2023 : тез. докл. XX Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 20–22 сент. 2023 г. / редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2023. – С. 744–746.
13. Кухарик, Е. А. Оценка трансформации земной поверхности территории Центральной Беларуси в результате автодорожного строительства / Е. А. Кухарик, А. С. Глаз // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 26–28 окт. 2023 г. : в 2 ч. / редкол.: С. А. Лысенко (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГУ, 2023. – Ч. 1. – С. 136–139.
14. Матвеев, А. В. Геохимия четвертичных отложений Беларуси / А. В. Матвеев, В. Е. Бордон. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 191 с.
15. Матвеев, А. В. Районирование территории Беларуси по возможным последствиям проявления природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса / А. В. Матвеев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 329–334. doi:10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334
16. Матвеев, А. В. Рельеф Белоруссии / А. В. Матвеев, Б. Н. Гурский, Р. И. Левицкая. – Минск : Университетское, 1988. – 320 с.

## References

1. Commission staff working paper «Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management» : Brussels, 21.12.2010, SEC(2010) 1626 final. Available at: [https://ec.europa.eu/echo/files/about/COMM\\_PDF\\_SEC\\_2010\\_1626\\_F\\_staff\\_working\\_document\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/echo/files/about/COMM_PDF_SEC_2010_1626_F_staff_working_document_en.pdf) (accessed 17 September 2024).
2. Vishnyakov Ya. D., Radaev N. N. *Obshchaya teoriya riskov* [General theory of risks]. Moscow, Akademiya, 2008. 368 p. (in Russian)
3. Mavlyanova N. G. (ed.) [et al.]. *Problemy snizheniya prirodnnykh opasnostei i riskov* [Problems of decrease in natural hazards and risks]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "GEORISK – 2012"*: v 2 t. [Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. "GEORISK – 2012": in 2 vol.]. Moscow, 2012, vol. 2, 311 p. (in Russian)
4. Yasoveev M. G. [et al.]. *Geoekologicheskie issledovaniya prirodnnykh kompleksov i geosistem* [Geoecological research of natural complexes and geosystems]. Minsk, 2008. 247 p. (in Russian)
5. Galkin A. N., Matveyev A. V., Pavlovskii A. I., San'ko A. F. *Inzhenernaya geologiya Belarusi: v 3 ch.* [Engineering geology of Belarus: in 3 part]. Vitebsk, Vitebsk State University, 2016–2018. Chast' 2: *Inzhenernaya geodinamika Belarusi* [Part 2: Engineering geodynamics of Belarus]. 2017, 452 p. (in Russian)
6. Osipov V. I. *Prirodnye katastrofy v tsentre vnimaniya uchenykh* [Natural disasters in the spotlight of scientists]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 1995, vol. 65, no. 6, pp. 483–495. (in Russian)
7. Palienko V. P. *K probleme neogeodinamicheskogo riska* [On the problem of neo-geodynamic risk]. *Novye geograficheskie znaniya i napravleniya issledovanii* [New geographical knowledge and research directions]. Kiev, Academperiodika Publ, 2006, pp. 232–241. (in Russian)
8. Kukharik E. A., Matveyev A. V. *Osobennosti proyavleniya sovremennoykh vodno-erzozionnykh protsessov na territorii Tsentral'noi Belarusi* [Features of manifestation of modern water-erosion processes in the Central Belarus territory]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 6, pp. 622–630. doi:10.29235/1561-8323-2022-66-6-622-630 (in Russian)
9. Kukharik E. A. *Razvitiye protsessov biogenного sedimento- i morfogeneza na territorii Tsentral'noi Belarusi* [The development of the processes of biogenic sediment- and morphogenesis on the territory of Central Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 185–194. doi:10.47612/2079-3928-2022-2-185-194 (in Russian)
10. Kukharik E. A. *Osobennosti proyavleniya sovremennoykh karstovykh i suffuzionnykh protsessov na territorii Tsentral'noi Belarusi* [Manifestation of modern karst and suffusion processes on the territory of Central Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2022, no. 2 (57), pp. 94–100 (in Russian)
11. Matveyev A. V., Kukharik E. A. *Sovremennye endogenyye geologicheskie protsessy na territorii Tsentral'noi Belarusi* [Modern endogenous geological processes in the territory of Central Belarus]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 2, pp. 156–163. doi:10.29235/1561-8323-2024-68-2-156-163 (in Russian)

12. Kukharik E. A., Glaz A. S. *Otsenka transformatsii zemnoi poverkhnosti territorii Tsentral'noi Belarusi v rezul'tate zheleznodorozhnogo stroitel'stva* [Assessment of the transformation of the earth's surface of the territory of Central Belarus as a result of railway construction]. *Molodezh' v nauke – 2023 : tezisy dokladov XX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Proc. XX Int. Sci. Conf. of Young Sci. "Youth in Science – 2023"]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2023, pp. 744–746. (in Russian)
13. Kukharik E. A., Glaz A. S. *Otsenka transformatsii zemnoi poverkhnosti territorii Tsentral'noi Belarusi v rezul'tate avtodorozhnogo stroitel'stva* [Assessment of the transformation of the earth's surface of the territory of Central Belarus as a result of road construction]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnykh regionov : sb. materialov VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. VI Int. sci.-pract. conf.'Current problems of Earth sciences: studies of transboundary regions']. Brest, 2023, in 2 parts, part 1, pp. 136–139. (in Russian)
14. Matveyev A. V., Bordon V. E. *Geokhimiya chetvertichnykh otlozhenii Belarusi* [Geochemistry of Quaternary deposits of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2013, 191 p. (in Russian)
15. Matveyev A. V. *Raionirovaniye territorii Belarusi po vozmozhnym posledstviyam proyavleniya prirodnykh i prirodnno-antropogennykh opasnostei litosfernogo klassa* [Zoning of the territory of Belarus through possible consequences of manifestation of nature and nature-anthropogenous hazards of lithosphere class]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 329–334. doi:10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334 (in Russian)
16. Matveyev A. V., Gurskii B. N., Levitskaya R. I. *Rel'ef Belorussii* [Relief of Belarus]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1988, 320 p. (in Russian)

#### Информация об авторах

**Матвеев Алексей Васильевич** – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: matveyev@nature-nas.by

**Кухарик Евгений Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией современной геодинамики и палеогеографии, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: shzhk@mail.ru

#### Information about the authors

**Aleksey V. Matveyev** – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Chief Researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: matveyev@nature-nas.by

**Evgeniy A. Kukharik** – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Lab of Modern Geodynamics and Paleogeography, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: shzhk@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД БРЕСТСКОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

В. Г. Жогло

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье изложен новый методический подход к оценке естественных ресурсов подземных вод слабодренированных речных бассейнов. Его апробация проведена на примере водосборов рек Лесная и Мухавец, занимающих большую часть территории Брестского гидрогеологического бассейна. Для оценки структуры баланса естественных ресурсов подземных вод создана численная геофильтрационная модель водосборов рек Лесная и Мухавец. Модель реализована на базе лицензионного программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк». Калибрация модели заключалась в получении заданной величины подземного стока в реки и согласовании модельных и фактических напоров грунтовых вод на период летне-осенней межени. Удовлетворительные результаты калибрации получены после расчленения модельного притока воды в расчетные блоки модели с реками на расход грунтовых вод собственно в реки и эвапотранспирацию.

Установлено, что в среднемноголетнем разрезе площадь моделируемых водосборов по направленности процесса водообмена между поверхностью земли и депрессионной поверхностью грунтовых вод подразделяется на примерно равные части: 1) территорию с положительной величиной инфильтрационного питания грунтовых вод; 2) территорию, на которой в среднемноголетнем разрезе преобладает разгрузка грунтовых вод в форме эвапотранспирации.

Дана количественная оценка составляющих баланса грунтовых, межпластовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец с учетом внутригодовых изменений интенсивности инфильтрационного питания: суммарная среднемноголетняя величина питания грунтовых вод – 92,4 мм/год; среднемноголетняя величина разгрузки грунтовых вод в реки – 44,1; суммарная среднемноголетняя величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией – 48,3; среднемноголетняя интенсивность водообмена между грунтовым и межпластовыми водоносными горизонтами – 14,2 мм/год.

**Ключевые слова:** подземные воды; естественные ресурсы; инфильтрация; испарение; эвапотранспирация; геофильтрация; инфильтрационный водообмен; Брестский гидрогеологический бассейн; Лесная; Мухавец; численное моделирование.

**Для цитирования.** Жогло В. Г. Особенности формирования естественных ресурсов подземных вод Брестского гидрогеологического бассейна // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 94–122.

## FEATURES OF NATURAL GROUNDWATER RESOURCE FORMATION IN BREST HYDROGEOLOGICAL BASIN

V. G. Zhoglo

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

The article presents a new methodological approach to assess the natural resources of groundwater in poorly drained river basins. Its implementation is demonstrated through the watersheds of the Lesnaya and Mukhavets rivers, which occupy a significant portion of Brest hydrogeological basin. To evaluate the structure of the balance of natural groundwater resources, a numerical geofiltering model for the watersheds of the Lesnaya and Mukhavets rivers was developed. The model was created using the licensed software of ModTech by Geolink LLC. The calibration process involved the obtaining of the specified amount of groundwater discharge into the rivers and reconciling the modeled and actual groundwater pressures during the summer-autumn low water period. Satisfactory calibration results were achieved after the segmenting of the modeled water inflow into the computational blocks of the model, dividing the groundwater discharge into the rivers and evapotranspiration.

It was established that in the long-term perspective, the area of modeled watersheds, concerning the process of water exchange between the land surface and the depression surface of groundwater, can be divided into approximately equal parts: 1) territory with a positive value of groundwater infiltration recharge; 2) territory where, in the long-term perspective, groundwater discharge in the form of evapotranspiration predominates.

A quantitative assessment was provided for the components of the balance of groundwater, interstitial, and surface waters in the watersheds of the Lesnaya and Mukhavets rivers, taking into account the intra-annual variations in the intensity of infiltration recharge: the total long-term average value of groundwater recharge is 92.4 mm/year; the long-term average value of groundwater discharge into the rivers is 44.1; the total long-term average value of groundwater discharge through evapotranspiration is 48.3; and the long-term average intensity of water exchange between the groundwater and interstitial aquifer horizons is 14.2 mm/year.

**Keywords:** groundwater; natural resources; infiltration; evaporation; evapotranspiration; geofiltration; infiltrative water exchange; Brest hydrogeological basin; Lesnaya; Mukhavets; numerical modeling.

**For citation.** Zhoglo V. G. Features of natural groundwater resource formation in Brest hydrogeological basin. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 94–122.

**Введение.** В настоящее время под естественными ресурсами подземных вод (ЕРПВ) понимается среднемноголетняя величина их питания в естественных условиях, или обеспеченный питанием расход потока. В Беларусь многие исследователи (М. Ю. Калинин, А. В. Кудельский, К. А. Курило, М. Г. Ясовеев) отождествляют естественные ресурсы пресных подземных вод только с величиной подземного стока в реки, тем самым игнорируя другие статьи расхода.

Известно, что значительную часть расхода грунтовых вод составляют испарение и транспирация растительностью (эвапотранспирационная разгрузка), которые по своей сути и физическому смыслу являются составной частью естественных ресурсов подземных вод. Поэтому естественные ресурсы равны сумме подземного стока в реки и расхода влаги на эвапотранспирацию. Недоучет этого процесса может приводить к существенному снижению обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод, а также являться причиной значительных ошибок при составлении гидрогеологических прогнозов, в особенности при составлении прогнозов влияния отбора подземных вод на речной сток, уровеньный режим и качество грунтовых вод. Наши оценки по юго-востоку Беларусь показывают, что в количественном отношении подземный сток в реки соизмерим с эвапотранспирацией [11, 12, 14].

В среднемноголетнем разрезе величина естественных ресурсов подземных вод определяется инфильтрационным питанием грунтовых вод за счет атмосферных осадков. Специфические особенности подземных вод, к которым относятся их возобновляемость в процессе общего круговорота влаги, подвижность и тесная взаимосвязь с другими компонентами окружающей среды (атмосферными осадками, речным стоком, водоемами, ландшафтами, растительностью), обуславливают ряд особенностей формирования величины ЕРПВ, а также сложностей в их количественной оценке.

В проблеме формирования ЕРПВ важнейшей задачей является оценка величины инфильтрационного питания грунтовых вод и ее динамики во времени. Формирование инфильтрационного питания – сложный процесс, обусловливаемый характером влагопереноса в зоне аэрации и процессами водообмена на поверхности земли. Данные по интенсивности питания грунтовых и подземных вод в целом являются составной частью всех гидрогеологических расчетов, в том числе и прогнозов массопереноса в подземных водах. Важность и актуальность этих данных обусловлена тем, что инфильтрационное питание является основной частью естественных ресурсов подземных вод зоны активного водообмена.

По мнению В. М. Шестакова, выдающегося российского (и советского) гидрографа, заслуженного профессора Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова [30, 31], И. К. Гавич [4, 5], С. П. Позднякова [24] и С. О Гриневского и [7–10], формирование питания грунтовых вод в определенных ландшафтных условиях является кардинальной естественно-научной проблемой геогидрологического цикла круговорота подземных вод, что связано с необходимостью изучения взаимовлияния антропогенных преобразований ландшафта на балансовые элементы грунтовых вод и крупномасштабного отбора подземных вод на ландшафты.

В последние годы увеличивается интерес к оценке перспектив использования подземных вод и адаптации стратегий водопотребления в связи с происходящими и прогнозными изменениями климата. Является очевидным, что для рационального использования и управления ресурсами подземных вод нужны надежные количественные оценки их величины и пространственно-временных изменений. Задачи рассматриваемого класса, ввиду их высокой сложности, могут успешно решаться только на системной основе с использованием методов математического моделирования.

Объектом наших исследований являются подземные воды зон активного и замедленного водообмена Брестского гидрогеологического бассейна от уровенной поверхности грунтовых вод до подошвы зоны трещиноватости кристаллического фундамента.

Цель работы – провести количественную оценку особенностей формирования инфильтрационного питания и естественных ресурсов подземных вод на территории Брестского гидрогеологического бассейна (в пределах Республики Беларусь). Основная задача – оценить составляющие баланса грунтовых, межпластовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец. В прикладном отношении работа ориентирована на оценку ресурсного потенциала пресных подземных вод и прогноз их качества на длительную перспективу.

В соответствии со структурно-гидрогеологическим принципом районирования нами исследованы подземные воды Брестского гидрогеологического бассейна. Стоит подчеркнуть, что при выделении гидрогеологических районов на основе структурно-гидрогеологического принципа границы смежных районов в гидродинамическом отношении, как правило, являются условными, поскольку через них возможно межструктурное взаимодействие потоков подземных вод. Таким образом, гидрогеологический район, выделенный по структурному принципу, практически никогда не может рассматриваться в качестве изолированного балансово-гидродинамического элемента гидролитосферы, что является неудобным при проведении ряда гидрогеологических исследований [1, 2]. В связи с этим общее гидрогеологическое районирование проводится также на основе балансово-гидродинамического принципа с выделением бассейнов подземного стока, под которыми понимаются гидравлически обособленные бассейны стока с общим направлением(-ями) движения поверхностных и подземных вод, определяемым положением основного базиса дренирования. Границами геогидродинамических систем являются основные водоразделы потоков подземных вод и крупные дрены [2, 22]. В соответствии с балансово-гидродинамическим принципом исследуемая нами территория относится к Неманско-Висленскому району Прибалтийской области подземного стока [22].

Учитывая единство природных вод, тесную взаимосвязь подземных и поверхностных вод в рамках геогидрологического цикла круговорота подземных вод, в качестве изолированного балансово-гидродинамического элемента гидролитосферы целесообразно рассматривать крупный речной бассейн. Такой подход эффективен не только в плане изучения гидрогеологических процессов, но и для управления состоянием природных вод.

Техническая сложность реализации бассейнового принципа на практике заключается в том, что крупные речные системы, полностью дренирующие верхний этаж гидролитосферы, имеют слишком большие площади водосбора и, как правило, находятся на территории нескольких государств, что значительно осложняет создание гидрогеологических моделей таких объектов. Водосборы малых рек не дренируют всю зону активного водообмена, поэтому не могут рассматриваться как балансово-замкнутые.

Эффективной альтернативой бассейнам подземного стока, пространственно совпадающим с бассейнами крупных рек, являются замкнутые балансово-гидродинамические элементы гидролитосферы, полностью включающие области питания, транзита и разгрузки подземных вод и изолированные от остальной части водосбора реки непроницаемыми в гидродинамическом отношении границами. Отметим, что такой подход соответствует принципам системности, потому что изолированный балансово-гидродинамический элемент гидролитосферы характеризуется замкнутостью циклов массо- и энергообмена. Любую гидрогеотермодинамическую систему можно расчленить на три элемента – область питания, транзита и разгрузки, однако, как отмечает Н. М. Фролов [29], лишь в своей совокупности они представляют систему, так как только такой объект приобретает свойство, которым не обладает ни один из трех элементов в отдельности (замкнутость циклов массо- и энергообмена).

Балансово-гидродинамический принцип использован нами для выбора местоположения внешних границ исследуемой территории в плане и количественного обоснования на них гидродинамических характеристик (напоров и расходов подземных вод).

Весьма просто и с высокой степенью обоснованности граничные условия реализуются вдоль водоразделов речных водосборов, русел крупных водотоков и линий тока подземных вод. В естественных условиях, в силу симметрии подземных потоков относительно русел крупных рек, вдоль последних по всем водоносным горизонтам может приниматься граничное условие 2-го рода с нулевым расходом. На территории Брестского гидрогеологического бассейна такие условия выполняются для рек Лесная и Мухавец. На этом основании на боковых границах исследуемой территории по всем водоносным горизонтам могут приниматься граничные условия 2-го рода с нулевым расходом (непроницаемые в гидродинамическом отношении границы). Взаимодействие такого балансово-гидродинамического элемента гидролитосферы с сопредельными гидрогеологическими объектами будет минимальным, что полностью отвечает требованиям системного подхода. Верхней границей исследуемого объекта является свободная поверхность грунтовых вод. Через эту границу осуществляется взаимодействие подземных вод верхнего гидрогеологического этажа с другими системами.

Таким образом, нами принимается, что в гидрогеодинамическом отношении водосборы рек Лесная и Мухавец представляют собой изолированный в плане и снизу балансово-гидродинамический элемент гидролитосферы. Исследования на основе бассейнового принципа открывают возможность применения данных по подземному стоку в реки при калибрации численных геофiltрационных моделей (ЧГФМ). Изложенные выше подходы использованы нами для создания ЧГФМ водосборов рек Лесная и Мухавец.

Актуальность рассматриваемого класса задач связана также с тем, что р. Западный Буг относится к числу трансграничных рек, а Республика Беларусь имеет ряд обязательств по трансграничному сотрудничеству с соседними странами в области рационального использования и охраны водных ресурсов.

Для рационального использования и охраны подземных вод особое значение приобретают прогнозы их качественного состояния. Повышенная сложность процессов миграции и их медленное развитие во времени во многом затрудняют, а иногда вообще исключают их физическое моделирование

или натурное изучение. Эти обстоятельства обусловили широкое использование в практике гидро-геомиграционных исследований методов математического моделирования при решении геофильтрационных и геомиграционных задач. Возможность их широкого применения стимулируется наличием мощных вычислительных средств и развитостью математического обеспечения численных расчетов [6, с. 3]. Еще в 1980-е годы В. А. Мироненко, выдающийся российский (и советский) гидрогеолог, профессор, член-корреспондент РАН, отмечал, что численное моделирование превратилось в своего рода символ передового научного подхода, в важнейший показатель качества проведенного исследования [20, с. 3].

#### Характеристика объекта исследования.

**Материалы по геологическому строению и гидрогеологическим условиям Брестского гидрогеологического бассейна.** Геолого-гидрогеологическая изученность Брестского гидрогеологического бассейна (БГГБ) является достаточно высокой. Геологическое строение и гидрогеологические условия изучали в процессе проведения геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических съемок различных масштабов и целевого назначения, поисково-разведочных работ для хозяйствственно-питьевого назначения, инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий в связи со строительством и эксплуатацией различных промышленных объектов. Имеются также обобщающие работы, посвященные различным вопросам рационального использования водных ресурсов и минерального сырья.

Еще в 1970–1971 гг. М. Ф. Козловым [25–27] подготовлен и опубликован пакет карт масштаба 1 : 500 000 по территории Припятского Полесья, в том числе карты глубин залегания первого от поверхности водоносного горизонта; гидроизогипс первого от поверхности водоносного горизонта; водопроводимости первого от поверхности водоносного горизонта; пьезоизогипс первого от поверхности напорного водоносного горизонта. Детальная характеристика региональной гидрогеологии, ионно-солевого состава и ресурсов пресных и минеральных подземных вод Беларуси, в том числе БГГБ, дана в работах М. Ф. Козлова [17], А. В. Кудельского и В. И. Пашкевича [19], а также других авторов. Государственным предприятием «НПЦ по геологии» в 2018 г. завершена очень важная в прикладном отношении работа по геологическому и гидрогеологическому доизучению территории Подляско-Брестской впадины, Луковско-Ратновского горста и западного склона Полесской седловины масштаба 1 : 200 000. По результатам этих исследований составлен комплект среднемасштабных карт четвертичных и до-четвертичных отложений, совмещенных с картами полезных ископаемых, геоморфологических карт, геологических карт палеозойских отложений и кристаллического фундамента. На всех геологических картах уточнены границы распространения стратиграфических подразделений. Впервые для изученной территории составлены среднемасштабные гидрогеологические карты, в том числе гидрогеологические карты четвертичных отложений, карты-схемы глубин залегания уровня грунтовых вод (зоны аэрации), карты гидроизопье, мощностей и проводимости для водоносного березинского-днепровского водно-ледникового комплекса, гидрогеологические карты дочетвертичных отложений. Перечисленные выше работы составили информационную основу численной геофильтрационной модели исследуемой территории.

**Геологическое строение.** Брестский гидрогеологический бассейн пространственно связан с Подляско-Брестской впадиной (ПБВ), расположенной на юго-западе Беларуси и смежных районах Польши. В пределах Беларуси ПБВ занимает центральную часть крайнего запада Полесской низменности в бассейне р. Западный Буг (рис. 1). Большая часть территории БГГБ в пределах Республики Беларусь приходится на водосборы рек Лесная и Мухавец.

ПБВ вытянута в субширотном направлении и представляет собой структурный залив, центриклинально замыкающийся на востоке и открытый в западном направлении. На западе впадина ограничена системой глубинных разломов, известной в литературе как линия Тейссейра – Торнквиста [16]. Восточная граница впадины проведена условно по изогипсе –0,5 км по поверхности кристаллического фундамента (рис. 2).

С севера и юга ПБВ впадина ограничена Свислочским и Северо-Ратновским разломами субширотного простирания. Первый разлом отделяет впадину от Белорусской антеклизы на севере, а второй – от Луковско-Ратновского горста на юге. Впадина вытянута на 350 км, ширина ее изменяется от 90 до 130 км. Поверхность фундамента в пределах впадины погружается в западном направлении до 9 км (см. рис. 1, 2).

Выполненный объем геологических и геофизических исследований позволил создать модель строения ПБВ [16]. Установлено, что впадина сложена образованиями рифейской и вендской систем верхнего протерозоя, кембрийской, ордовикской, силурийской, девонской, каменноугольной, пермской систем палеозойской эратемы, триасовой, юрской, меловой систем мезозойской эратемы, палеогеновой, неогеновой, четвертичной систем кайнозойской эратемы (рис. 3).

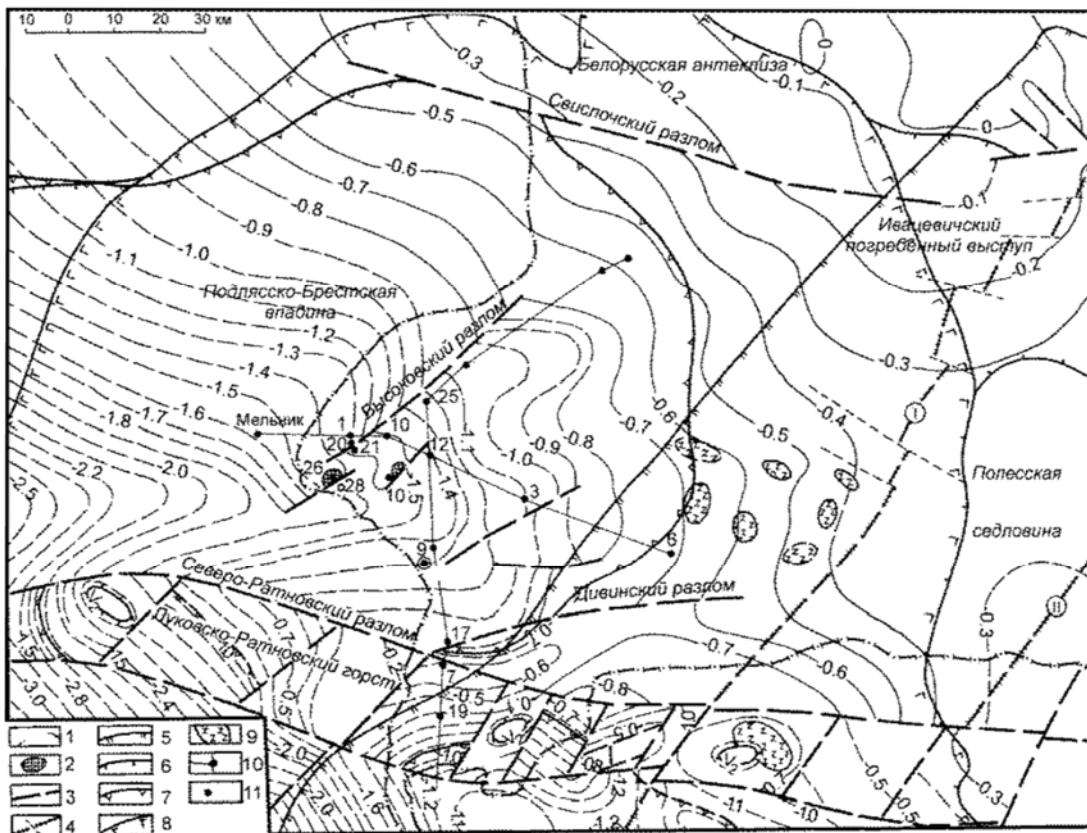


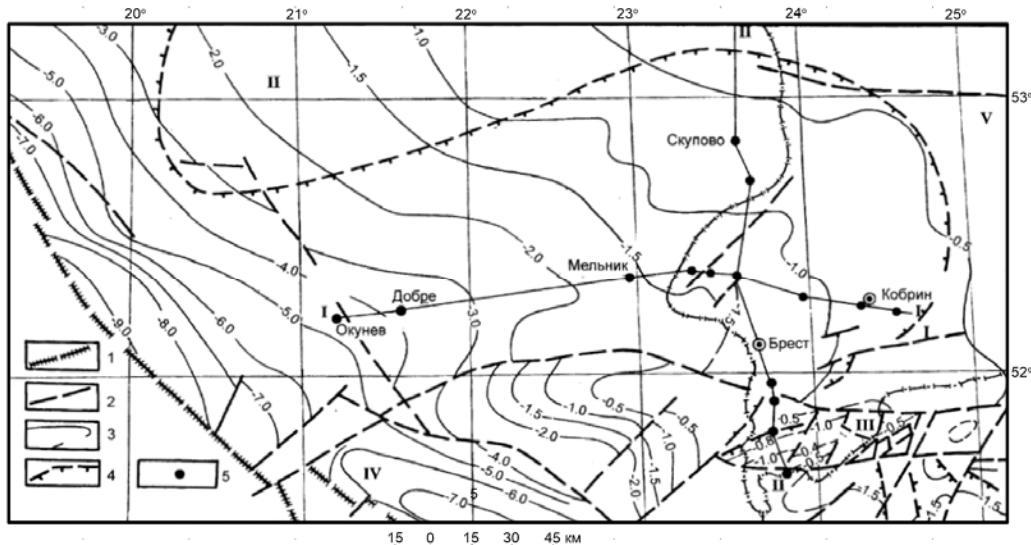
Рис. 1. Тектоническая карта восточной части Подлясско-Брестской впадины [16]:  
 1 – изогипсы поверхности фундамента, км; 2 – локальные структуры (Прибугская, Кустинская);  
 разломы: 3 – проникающие в чехол, 4 – не проникающие в чехол;  
 границы распространения отложений структурных комплексов: 5 – нижнебайкальского,  
 6 – верхнебайкальского, 7 – каледонского, 8 – траповой формации венда;  
 9 – интрузии габбро-диабазов; 10 – линии геологических профилей; 11 – скважина и ее номер

Fig. 1. Tectonic map of the eastern part of the Podlasie-Brest Depression [16]:  
 1 – isohyps of the basement surface, km; 2 – local structures (Pribugskaya, Kustinskaya);  
 faults: 3 – penetrating into the cover, 4 – not penetrating into the cover;  
 boundaries of spreading of deposits of structural complexes: 5 – Lower Baikalian,  
 6 – Upper Baikalian, 7 – caledonian, 8 – vendian trap formation;  
 9 – gabbro-diabase intrusions; 10 – lines of geological profiles; 11 – well and its nome

В платформенном чехле выделены готский, нижнебайкальский, верхнебайкальский, каледонский, герцинский и киммерийско-альпийский структурные комплексы (СК) [16]. Образования готского СК вскрыты только в скв. Мельник и представлены диабазами мощностью 18 м. Нижнебайкальский (рифей-ранневендский) СК представлен красноцветной алеврито-песчаной формацией рифея, которая распространена в крайней восточной части впадины (в пределах Беларуси). Мощность отложений достигает 204 м. Верхнебайкальский (поздневендско-раннекембрийский) СК объединяет образования разного генезиса и вещественного состава. Вертикальный ряд формаций составляют континентальная гравелито-песчаная (горбашевский горизонт венда), траповая (ратайчицкая свита), вулканомиктовая (лиозненская свита венда), морская песчано-глинистая (редкинский и котлинский горизонты венда, ровенский и лонтоваский горизонты кембрия) формации. Каледонский СК сложен морскими формациями кембрийского, ордовикского, силурийского и раннедевонского (жединский век) возраста. Герцинский СК объединяет формации каменноугольного (намюрский и вестфальский ярусы), позднепермского и раннетриасового возраста; развит в основном на территории Польши; в белорусской части впадины имеет ограниченное распространение. Киммерийско-альпийский СК включает отложения от верхнетриасовых до антропогеновых и подразделяется на верхнетриасово-юрский, мел-палеоценовый и эоцен-антропогеновый этажи.

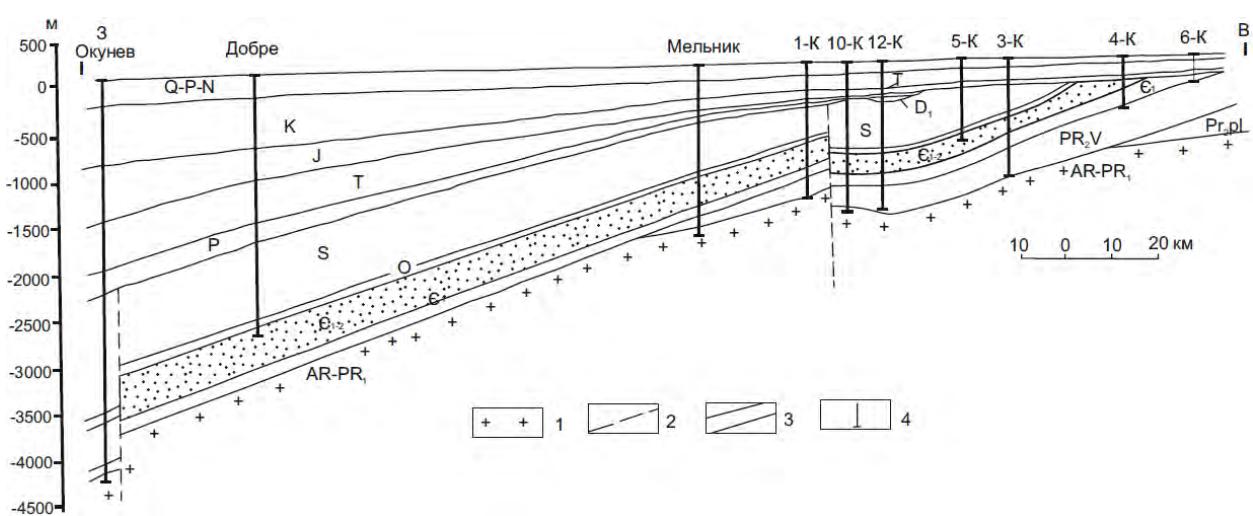
Современная структура ПБВ сформировалась при наложении и интерференции разновозрастных прогибов и впадин разного профиля, миграции их осевых частей, неоднократного возобновления тектонических движений вдоль разломов, сопровождающихся вулканической деятельностью [16].

Роль разрывных нарушений в формировании гидрологических условий ПБВ до настоящего времени практически не изучена. В связи с этим стоит отметить, что большое количество разрывных нарушений при условии их высокой проницаемости в отложениях платформенного чехла может оказывать значительное влияние как на пространственную структуру геофильтрационного потока, так и на интенсивность массопереноса не только в зоне активного водообмена, но и в более глубоких частях ПБВ.



**Рис. 2. Структурная карта поверхности кристаллического фундамента Подлясско-Брестской впадины (выкопировка с карты Tectonic Map, 1988) [16]:**  
**1 – линия Тейссира – Торнквиста; 2 – основные разломы; 3 – изогипсы поверхности фундамента, км;**  
**4 – границы распространения кембрийских отложений; 5 – скважины.**  
**Структуры: I – Подлясско-Брестская впадина; II – Мазурский выступ Белорусской антеклизы;**  
**III – Луковско-Ратновский выступ; IV – Львовско-Любинский прогиб; V – Полесская седловина**

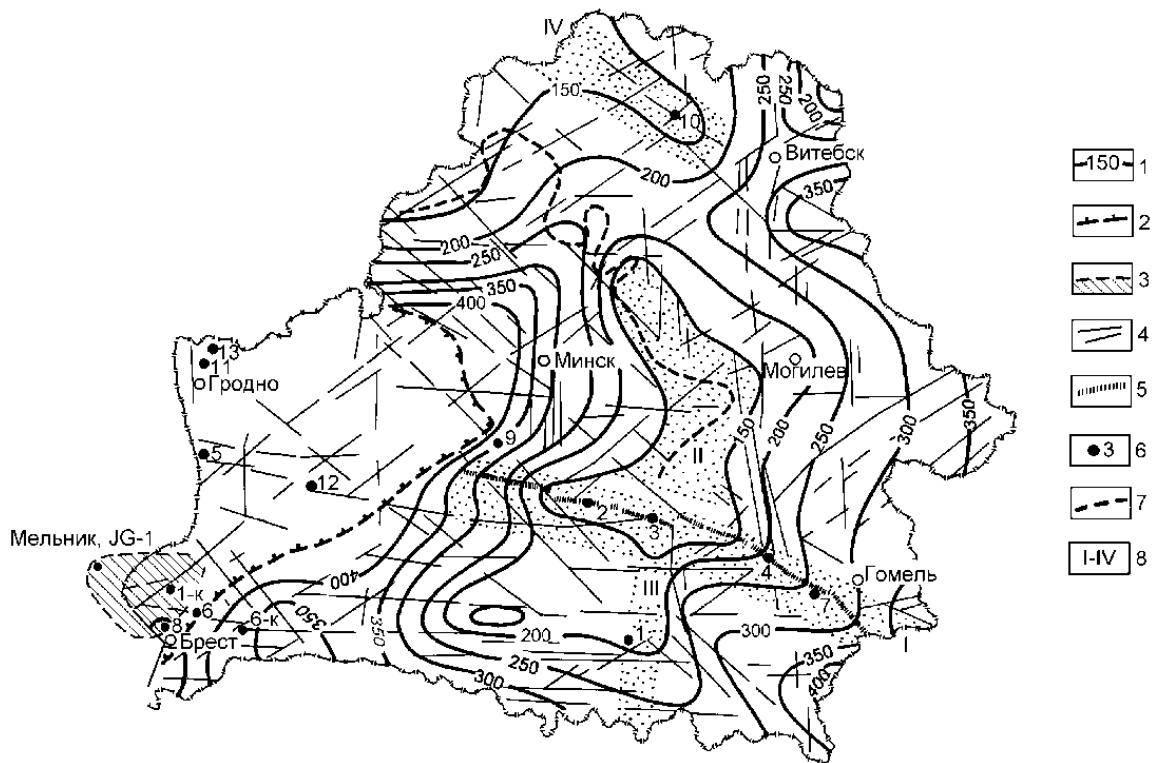
**Fig. 2. Structural map of the crystalline basement surface of the Podlasie-Brest Depression (copied from the Tectonic Map, 1988) [16]:**  
**1 – Teisseir – Tornquist line; 2 – main faults; 3 – isohyps of the basement surface, km;**  
**4 – distribution boundaries of cambrian sediments; 5 – wells.**  
**Structures: I – Podlasie-Brest depression; II – Mazurian ledge of the Belarusian antecline;**  
**III – Lukovsko-Ratnovsky ledge; IV – Lviv-Lublin trough; V – Polesskaya saddle**



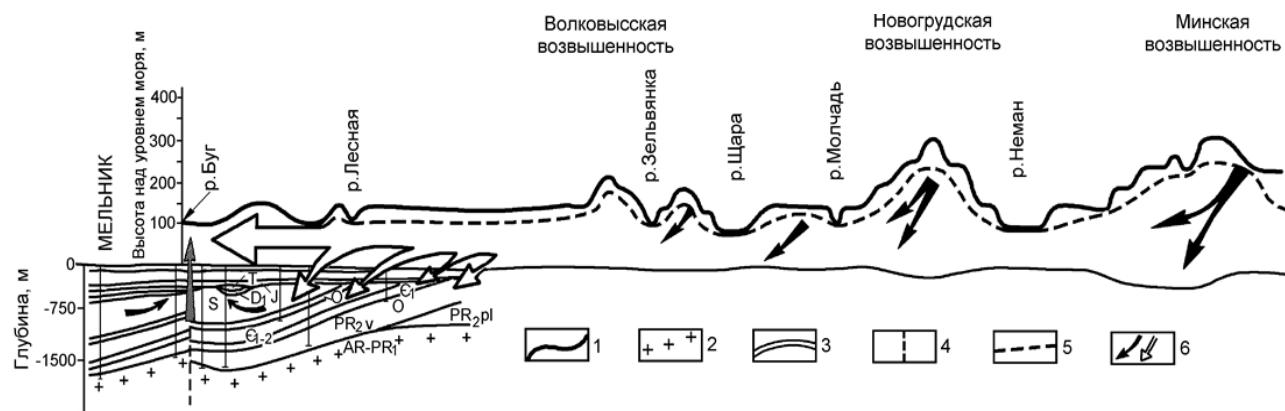
**Рис. 3. Геологический разрез по профилю Подлясско-Брестской впадины по профилю I–I:**  
**Окунев – Добре – Мельник – 1-К – 10-К – 12-К – 5-К – 3-К – 4-К – 6-К [16]**

**Fig. 3. Geological section along the strike of the Podlasie-Brest depression along profile I–I:**  
**Okunev – Dobre – Melnyk – 1-K – 10-K – 12-K – 5-K – 3-K – 4-K 6 – K [16]**

**Гидрогеологические условия БГГБ.** Отличительной особенностью БГГБ является высокая мощность слоя пресных подземных вод (рис. 4). В целом, на территории Беларуси мощность слоя пресных вод варьирует от 50–150 до 400–450 м, в среднем составляя 300–350 м. Однако в крайних юго-западных районах Беларуси опресненные до 2 г/дм<sup>3</sup> подземные воды распространены до глубин 1000–1200 м (Кустинская и Прибугская структуры).



С позиций подземной гидродинамики, единовременное (в геологическом смысле) появление высокоподнятых конечно-моренных гряд на относительно пленепленизированном предплейстоценовом субстрате означало внезапное (единовременное) появление области дополнительных гидростатических напоров (до 3,5–4,0 МПа), обеспечивших последующее (по крайней мере, в течение 130–150 тыс. лет) интенсивное промывание нижележащих отложений платформенного чехла, от неоген-палеогеновых и меловых до архей-протерозойских в пределах наиболее высокоподнятой части Белорусской антеклизы (рис. 5). Наличие здесь пьезометрических максимумов обусловило и промывание пресными водами, в том числе узкого блока кембро-силурийских отложений ПБВ в зоне между Высоковским и Кустинским разломами до глубины 1000 м, что стало возможным после неогеодинамического «оживления» контролирующих долину р. Буг разломов, обеспечивших разгрузку первично-морских седиментационных вод кембрия, ордовика и силура в речную систему Буга [19, с. 152–153].



**Рис. 5. Схематический геолого-гидрогеологический разрез по профилю Белорусская антеклиза – восточная часть Подляско-Брестской впадины [19]: 1 – профиль земной поверхности по линии Минская возвышенность – долина р. Буг в районе г. Высокое; 2 – кристаллический фундамент; 3 – границы геологических формаций; 4 – тектоническое нарушение по долине р. Западный Буг; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – направления потоков подземных вод**

**Fig. 5. Schematic geological and hydrogeological section along the profile of the Belarusian Antekliza – eastern part of the Podlasie-Brest depression [19]: 1 – profile of the earth surface along the line Minsk upland – valley of the Bug River near Vysokoye; 2 – crystalline basement; 3 – boundaries of geological formations; 4 – tectonic disturbance along the West Bug River valley; 5 – groundwater table; 6 – groundwater flow directions**

Вывод А. В. Кудельского об узкоблоковой промытости кембро-силурийских отложений основан на следующих гидрохимических материалах [19, с. 153]:

– широкое развитие пресных (до 1–2 г/дм<sup>3</sup>) подземных вод в разрезе Прибугской и Кустинской брахиантеклиналей до глубины 1000 м;

– в нескольких километрах западнее-северо-западнее скважины 1 (Кустинская опорная) на территории Польши в скважине «Мельник» (см. рис. 4) в отложениях нижнего кембрия и верхнего протерозоя (1580–1790 м) вскрыты высокоминерализованные воды (до 17,4 г/дм<sup>3</sup>) и рассолы (55 г/дм<sup>3</sup>) хлоридно-натриево-кальциевого типа, что может расцениваться как свидетельство северо-западного ограничения пресноводного бассейна подземных вод в разрезе кембро-силурийско-ордовикских отложений;

– о юго-восточном ограничении пресноводного бассейна в указанном комплексе пород свидетельствуют хлоридно-кальциевые рассолы (45,8 г/дм<sup>3</sup>), вскрытые скважиной № 3 в разрезе ратайчицкой свиты верхнего протерозоя (852–1128 м), а также воды повышенной минерализации (9,3–11,6 г/дм<sup>3</sup>) в средне- и верхнепротерозойских отложениях, которые были вскрыты на глубинах от 610 до 1280 м скважинами 1 и 6-к (см. рис. 4).

А. В. Кудельский полагает, что высказанная им гипотеза происхождения мощного пресноводного разреза в кембрийско-меловом комплексе Подляско-Брестской впадины за счет его промывания пресными водами со стороны Белорусской антеклизы подтверждается материалами польских гидрогеологов Т. Михальского и З. Плохниевского, из которых следует, что между Карпатской горноскладчатой областью и Подляско-Брестской впадиной в кембрийских отложениях содержатся рассолы с минерализацией более 200 г/дм<sup>3</sup>. Этим обстоятельством практически исключается из рассмотрения какое-либо участие Карпат в формировании мощного пресноводного разреза в кембрии ПБВ [19, с. 153–154].

Не останавливаясь на оценке информативности и репрезентативности схематического геолого-гидрогеологического разреза по профилю Белорусская антеклиза – восточная часть ПБВ (см. рис. 5) и на оценке степени обоснованности выводов А. В. Кудельского об условиях формирования пресных подземных вод на территории ПБВ, отметим, что какие-либо количественные оценки или расчеты у А. В. Кудельского отсутствуют, а все его построения и рассуждения носят чисто умозрительный характер.

В разрезе БГГБ выделяются две разобщенные гидродинамические системы – верхняя и нижняя. Верхняя гидродинамическая система охватывает водоносные горизонты и комплексы антропогеновых, палеоген-неогеновых, верхнемеловых, альбских и верхнеюрских отложений и характеризуется интенсивным водообменом, активной связью с поверхностным стоком и повсеместным развитием пресных вод. Питание всех водоносных горизонтов и комплексов верхней гидродинамической системы осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгружаются подземные воды в реки, озерные и болотные водоемы. Нижезалегающая глинисто-мергельная толща ордовика и силура, а также слабообводненные глинисто-карбонатные образования верхней перми и триаса представляют собой региональный водоупор, отделяющий верхнюю гидродинамическую систему от нижней. В объеме последней водоносные горизонты и комплексы трещиноватого кристаллического фундамента, верхнего протерозоя и нижнего кембрия гидродинамически обособлены горизонтом кембрийских «синих глин» от вышележащих горизонтов, связанных с терригенными породами среднего и верхнего кембрия. Нижняя гидродинамическая система характеризуется относительно замедленным водообменом, ей свойственны солоноватые хлоридные натриевые воды [19, с. 34–35].

На территории БГГБ в разрезе верхней гидродинамической системы региональное распространение имеют днепровская морена и сантон-туронская мергельно-меловая толща, представляющие собой слабопроницаемые слои. По их наличию в разрезе выделяется несколько водоносных комплексов: 1) верхний (безнапорный), включающий водно-ледниковые, аллювиальные и озерно-болотные отложения, залегающие на днепровской морене; 2) средний (палеоген-среднечетвертичный), включающий межморенные березинско-днепровские и палеоген-неогеновые песчаные отложения; 3) нижний (оксфорд-сеноманский), связанный с песками сеноманского и известняками оксфордского ярусов.

Фильтрационные свойства первого от поверхности водоносного комплекса детально изучали при проведении работ для целей осушения и гидротехнического строительства. По данным 97 пробных и опытных откачек среднее значение коэффициента фильтрации песков различного генезиса составляет 7,8 м/сут, мощность – 7–10 м. М. Ф. Козловым еще в 1970 г. составлена карта проводимости ( $km_1$ ) данного комплекса:  $km_1$  изменяется от 5 до 300 м<sup>2</sup>/сут (рис. 6).

Подстилается безнапорный водоносный комплекс днепровской мореной, сложенной супесями и суглинками с прослойями и линзами песков. По данным опытно-фильтрационных работ Западной геологоразведочной партии «Государственное предприятие «НПЦ по геологии», параметр перетока ( $\chi_{1-2}$ ) днепровской морены варьирует от  $0,3 \cdot 10^{-4}$  до 0,01 1/сут, общая мощность колеблется от 20 до 40 м. Коэффициенты фильтрации моренных суглинков изменяются от 0,0001 до 0,02 м/сут.

Водовмещающими отложениями среднего водоносного комплекса являются разнозернистые пески средне-нижнечетвертичных и палеоген-неогеновых отложений. Их фильтрационные свойства изменяются в широких пределах. Коэффициент фильтрации варьирует от 0,5 до 20 м/сут. Его среднее значение, по материалам 39 откачек, равно 5,5 м/сут, общая мощность – 15–50 м. Проводимость данного комплекса изменяется незакономерно в интервале 50–255 м<sup>2</sup>/сут (рис. 7).

Под палеогеновыми отложениями залегает мергельно-меловая толща, мощность которой достигает 240 м. На основе имеющейся карты мощностей мергельно-меловой толщи нами составлена цифровая карта параметра перетока ( $\chi_{2-3}$ ), на которой значения ( $\chi_{2-3}$ ) изменяются от  $2,5 \cdot 10^{-5}$  до  $1,1 \cdot 10^{-4}$  1/сут.

Водовмещающие породы нижнего (оксфорд-сеноманского) водоносного комплекса представлены тонко- и мелкозернистыми песками сеномана и трещиноватыми кавернозными известняками и мергелями оксфордского яруса верхней юры общей мощностью от 40 до 100 м. Коэффициенты фильтрации изменяются от 0,5 до 20–25 м/сут.

Зона замедленного водообмена отделена от зоны активного водообмена толщей слабопроницаемых отложений мощностью 600–800 м (от кембрийских «синих глин» до юры включительно). По аналогии с соседними регионами вертикальная проницаемость этой толщи принята равной 0,007 м/сут, а коэффициент перетока – 0,00001 1/сут.

Гидрогеологическая изученность зоны замедленного водообмена БГГБ является крайне низкой, что затрудняет количественные оценки как по этой зоне, так и по ее влиянию на процессы в зонах активного водообмена. На основе имеющихся материалов в нижней гидродинамической системе БГГБ выделен один слабоводоносный комплекс в трещиноватой части кристаллического фундамента и осадочных образованиях верхнего протерозоя – нижнего кембрия (верхнепротерозийский-нижнекембринский водоносный комплекс). Судя по дебитам опробованных интервалов водовмещающих пород, проводимость комплекса не превышает 1–5 м<sup>2</sup>/сут. Для расчетов принимается  $km_4 = 1,0$  м<sup>2</sup>/сут.

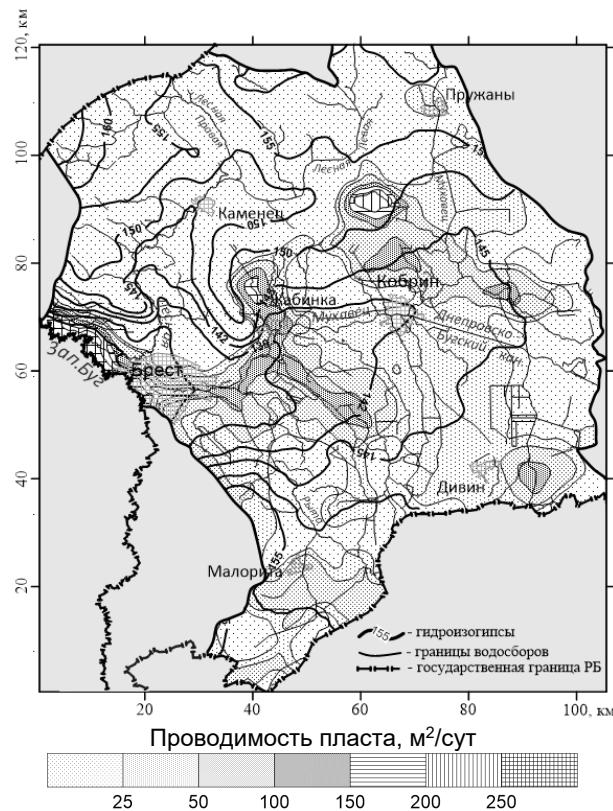


Рис. 6. Гидродинамическая карта грунтового водоносного горизонта (по материалам [17, 25])

Fig. 6. Hydrodynamic map of the groundwater aquifer (based on [17, 25])



Рис. 7. Гидродинамическая карта палеоген-среднечетвертичного водоносного комплекса

Fig. 7. Hydrodynamic map of the Palaeogene-Middle Quaternary aquifer complex

**Методика гидрогеодинамических расчетов.** Для выполнения гидрогеодинамических расчетов, необходимых при исследовании условий формирования естественных ресурсов подземных вод, нами использован метод математического моделирования. ЧГФМ водосборов рек Лесная и Мухавец построена на базе лицензионного программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (вычислительная программа GWFS, разработчик А. А. Рошаль, г. Москва). Система управления качеством разработки ПО ЗАО «Геолинк Консалтинг» в 2002 г. сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001:2000. ВП GWFS (Ground Water Flow Simulation – моделирование фильтрации подземных вод) предназначена для решения гидрогеологических задач, связанных с анализом и прогнозом движения подземных вод. Она позволяет осуществлять моделирование стационарных и нестационарных задач геофильтрации в многослойных и квазитрехмерных изотропных и анизотропных в плане системах. Фильтрация подземных вод в анизотропном проницаемом пласте описывается в декартовой системе координат дифференциальным уравнением [15]:

$$\mu(x, y) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ T_x(x, y) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ T_y(x, y) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + A_b(x, y)(H - H_b) + A_h(x, y)(H - H_h) + q(x, y), \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент упругой (для напорного пласта) или гравитационной (для безнапорного пласта) водоотдачи (при переменном напорно-безнапорном режиме фильтрации коэффициент водоотдачи принимает соответствующее значение в зависимости от положения уровня по отношению к отметке кровли пласта);  $T_x$  и  $T_y$  – проводимости проницаемого пласта вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно (для изотропного пласта эти значения совпадают);  $A_b$  и  $A_h$  – коэффициенты перетока через выше- и нижележащий слабопроницаемые слои соответственно;  $q(x, y)$  – интенсивность площадных и точечных источников (стоков);  $H$ ,  $H_b$  и  $H_h$  – абсолютные (или относительные) отметки уровней подземных вод расчетного, выше- и нижележащего проницаемых пластов соответственно;  $x$  и  $y$  – линейные координаты;  $t$  – текущее время.

В случае безнапорной фильтрации плановая проводимость однородного проницаемого пласта пропорциональна его мощности. При стационарной фильтрации левая часть уравнения (1) равна нулю.

Для решения уравнения (1) в программной системе GWFS используется метод конечных разностей. С этой целью область моделирования в плане разбивается прямоугольной (в общем случае неравномерной) сеткой с шагами по осям координат  $X$  и  $Y$ , равными

$$\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_{nx} \text{ и } \Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_{ny},$$

где  $nx$  и  $ny$  – число шагов по осям  $X$  и  $Y$  соответственно. Их максимальное количество определяется лишь техническими возможностями вычислительной техники.

Уравнение (1) в конечных разностях для  $k$ -го слоя (по оси  $Z$ ) и некоторого расчетного блока с координатами  $i$  (по оси  $Y$ ) и  $j$  (по оси  $X$ ) и момента времени  $t$  имеет вид:

$$\begin{aligned} & T_t(H_t - H) + T_w(H_w - H) + T_n(H_n - H) + T_e(H_e - H) + \\ & + T_s(H_s - H) + T_b(H_b - H) + T_h(H_h - H) + Q_b = 0, \\ & H = H_{i,j,k}^t, \quad H_t = H_{i,j,k}^{t-\Delta t}, \quad H_w = H_{i,j-1,k}^t, \quad H_n = H_{i-1,j,k}^t, \quad H_e = H_{i,j+1,k}^t, \\ & H_s = H_{i+1,j,k}^t, \quad H_b = H_{i,j,k-1}^t, \quad H_h = H_{i,j,k+1}^t, \quad Q_b = Q_{b,i,j,k}^t, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_t$  – временная проводимость;  $T_w$ ,  $T_n$ ,  $T_e$  и  $T_s$  – плановые межблочные проводимости (между расчетным блоком с координатами  $(i, j)$  и блоками с координатами  $(i, j-1)$ ,  $(i-1, j)$ ,  $(i, j+1)$  и  $(i+1, j)$  соответственно;  $T_b$  и  $T_h$  – вертикальные межблочные проводимости (между расчетным блоком  $k$ -го пласта и соответствующими блоками вышележащего ( $k-1$ ) и нижележащего ( $k+1$ ) пластов);  $Q_b$  – суммарный приток в блок.

Суммарная величина притока в блок определяется выражением

$$Q_{b,i,j} = Q_{w,i,j} + Q_{r,i,j} + Q_{p,i,j} + Q_{d,i,j} + Q_{c,i,j}, \quad Q_{c,i,j} = Q_{c,i,j,k}^t, \quad (3)$$

где  $Q_{w,i,j}$  – инфильтрационное питание (+) или эвапотранспирация (-) подземных вод;  $Q_{r,i,j}$  – расход подземных вод в поверхностные водотоки или приток воды в пласт из водотоков;  $Q_{p,i,j}$  – дебит родников (источников) подземных вод;  $Q_{d,i,j}$  – приток подземных вод к дренам;  $Q_{c,i,j}$  – дебит нагнетательных или водозаборных скважин. В выражении (3) первые три слагаемых могут быть заданы только для первого от поверхности водоносного горизонта (расчетного водоносного пласта), т. е. для  $k = 1$ .

Записав уравнения типа (2) для всех узлов пространственной сетки, получим  $px \cdot py \cdot k$  уравнений. Решение такой системы алгебраических уравнений осуществляется итерационным методом по неявной схеме. В программной системе GWFS использован шахматный алгоритм Чебышева [15]. В последней версии программы добавлены PCG2 (метод сопряженного градиента) © US Geological Survey; SIP (метод неявного решения) © US Geological Survey; SSOR (метод послойной релаксации) © US Geological Survey; LMG (метод множественных сеток) © US Geological Survey.

**Краткая характеристика численной геофильтрационной модели водосборов рек Лесная и Мухавец.** Для решения задач по количественной оценке условий формирования инфильтрационного водообмена и естественных ресурсов подземных вод в бассейнах рек Лесная и Мухавец создана численная геофильтрационная модель (рабочее название модели – «LiM»). Территория водосборов аппроксимирована сеточной областью с шагом сетки в плане 1000 м (всего 106 блоков по оси X и 121 блок по оси Y).

**Гидрогеодинамическая стратификация.** В соответствии с гидрологическими условиями водосборов рек Лесная и Мухавец в разрезе исследуемой области выделены четыре водоносных пласта и три разделяющих слоя:

- 1-й водоносный пласт (1ВП) – водно-ледниковые, аллювиальные и озерно-болотные отложения, залегающие на днепровской морене;
- 1-й разделяющий слой (1РС) – супеси и суглинки днепровской морены;
- 2-й водоносный пласт (2ВП) – песчаные отложения березинско-днепровского и палеоген-неогенового возраста;
- 2-й разделяющий слой (2РС) – мергельно-меловая толща верхнего мела;
- 3-й водоносный пласт (3ВП) – пески сеноманского возраста и трещиноватые кавернозные известняки оксфордского яруса верхней юры;
- 3-й разделяющий слой (3РС) – толща слабопроницаемых отложений мощностью 600–800 м от кембрийских «синих глин» до юры включительно;
- 4-й водоносный пласт (4ВП) – трещиноватая часть пород кристаллического фундамента и осадочные образования верхнего протерозоя.

При воспроизведении на модели водоносных пластов и разделяющих слоев учтена плановая неоднородность геофильтрационной среды зоны активного водообмена. На модели реализована непрерывная изменчивость в плане 1-го и 2-го водоносных пластов, а также 1-го и 2-го разделяющих слоев по величине проницаемости. ЗВП представлен кусочно-однородным по проницаемости; всего выделено три зоны с проводимостью 160, 175 и 200 м<sup>2</sup>/сут. ЗРС и 4ВП, представляющие в модели зону замедленного водообмена, заданы однородными по проницаемости.

**Границные условия.** Местоположение границ исследуемой территории определено на основе балансово-гидродинамического принципа. Внешние (боковые) границы замкнутых балансово-гидродинамических элементов гидролитосферы могут проводиться по линии водоразделов речных долин, русел крупных водотоков и линиям тока подземных вод. На этом основании в качестве внешних границ водосборов рек Лесная и Мухавец принимаются (см. рис. 5): на западе – северо-западе – водораздел р. Лесная с реками Пульва, Нарев и Ясельда; на западе – северо-западе и севере – водораздел р. Лесная с реками Пульва и Нарев; на северо-востоке и востоке – водораздел р. Мухавец с р. Ясельда (Балтийско-Черноморский водораздел); на юго-востоке – государственная граница Республики Беларусь вблизи водораздела рек Мухавец и Припять; на юго-западе – водораздел между притоками рек Мухавец и Западный Буг. Кроме того, на западе граница модели частично проходит по р. Западный Буг.

Внутренние границы – это реки Лесная, Лесная Левая, Лесная Правая, Мухавец, Рыта, их притоки и мелиоративные каналы. К внутренним границам относятся также эксплуатационные скважины водозаборов г. Бреста.

Верхней границей моделируемой области является уровенная поверхность грунтовых вод. Для решения геофильтрационных задач нами использована карта гидроизогипс, составленная по материалам «Государственное предприятие «НПЦ по геологии» (см. рис. 5).

За нижнюю непроницаемую границу принята подошва зоны трещиноватости кристаллического фундамента ПБВ.

В модели водосборов Лесная и Мухавец созданы также информационные слои «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфилтратационное питание». Слой «абсолютные отметки поверхности земли» при решении геофильтрационных задач в напорах позволяет вычислять глубины залегания уровней грунтовых вод. Слой «поверхностные воды» предназначен для задания данных по параметрам взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками и водоемами, слой «инфилтратационное питание» – для вычисления напоров грунтовых вод и глубин их залегания при заданной величине интенсивности инфильтрационного питания.

В исходной ЧГФМ предполагается, что все информационные и расчетные пласти и слои имеют повсеместное распространение.

**Гидрография и рельеф.** В ЧГФМ «LiM» гидрография и рельеф представлены цифровой картой рельефа и гидрографической сети водосборов рек Лесная и Мухавец (рис. 8). Планово-высотное согласование абсолютных отметок рельефа и гидрографической сети выполнено Д. Д. Ковалевой. Основными водными объектами на исследуемой территории являются реки Лесная и Мухавец.

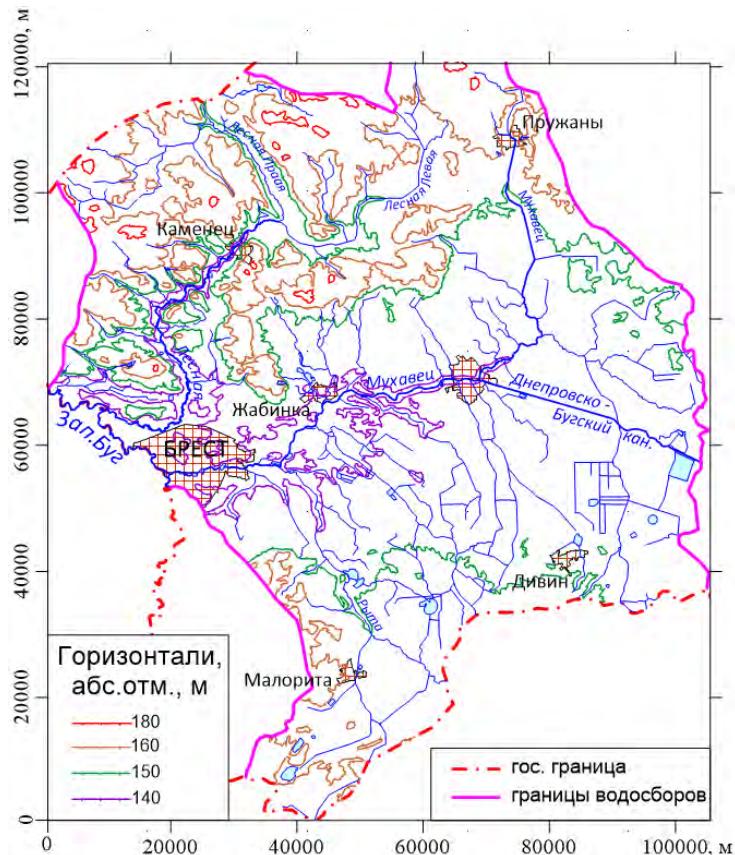


Рис. 8. Цифровая карта рельефа и речной сети водосборов рек Лесная и Мухавец

Fig. 8. Digital relief map and river network of the Lesnaya and Mukhavets river catchments

Рельеф территории Подлясско-Брестской впадины представляет собой сложное сочетание типов, подтипов и форм, сформировавшихся в различных климатических условиях. Преобладающими являются гляциенные образования, хотя заметную роль играют также аллювиальные, озерно-аллювиальные, золовые, болотные, биогенные и техногенные. Описание рельефа ПБВ приводится нами по монографии [28].

На территории ПБВ широкое развитие получили разные по площади болотные массивы. На крайнем западе выделяется долина р. Западный Буг. Она имеет четко выраженную пойму шириной до 500,0 м и широкую (до 6,5 км) первую надпойменную террасу. Превышение уровня террасы над поймой в районе достигает 3,8 м. Поверхность террасы заболочена. Заболоченные участки разделяются невысокими узкими песчаными грядами.

В целом для облика земной поверхности территории ПБВ характерна выраженная ярусность рельефа. Верхний ярус с абсолютными отметками более 170,0 м образуют останцы денудированных гряд и холмов. Территории с отметками 160,0–170,0 м и 150,0–160,0 м образуют два яруса пологоволнистых равнин, осложненных холмиками и буграми. Еще ниже на абсолютных отметках 130,0–150,0 м располагаются плоские слабовогнутые равнины и низины, в значительной степени заболоченные.

В результате деятельности постоянных водотоков в пределах впадины были созданы речные долины преимущественно пойменного типа, среди которых выделяются долины рек Лесная, Мухавец, Пульва, Рыта, Западный Буг. Речные долины врезаны в отложения окружающих территорий на 10,0–50,0 м и занимают самый низкий гипсометрический уровень земной поверхности.

Важную информацию об орографии дают показатели холмистости и западинности. Пространственные распределения средних значений холмистости согласуются с распределением средних значений абсолютной высоты, глубины и густоты расчленения, крутизны склонов. Нижняя ступень рельефа

имеет показатель холмистости до 1 ед/км<sup>2</sup>, на площади пологоволнистых равнин этот показатель составляет 3–4 ед/км<sup>2</sup>, а в местах распространения холмистого рельефа возрастает до 7 ед/км<sup>2</sup>.

Закономерности распределения западин и их среднее количество на единицу площади в пределах ПБВ не согласуются с таковыми значениями других морфометрических характеристик. Западины – это пониженные чашеобразные формы рельефа диаметром 200–500 м. В пределах моренно-водно-ледниковых равнин западины являются важным элементом рельефа, на отдельных участках насчитывается до 5 ед/ км<sup>2</sup>. На территории водно-ледниковых равнин количество этих форм снижается до 3–4 ед/км<sup>2</sup>, а на пониженных и заболоченных элементах рельефа – до 1–2 ед/км<sup>2</sup>.

Наиболее распространенными категориями ледникового рельефа являются холмисто-грядовые конечные морены, маркирующие положения краевой зоны ледника на определенных этапах его деградации, а также участки моренных и флювиогляциальных равнин. Доминирующее положение в рельефе занимают флювиогляциальные, озерно-аллювиальные, болотные, моренные поверхности и краевые ледниковые (конечно-моренные) образования.

**Методика реализации на ЧГФМ «LiM» результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод.** Одной из наиболее сложных задач построения математических моделей геофильтрации является реализация взаимосвязи подземных и поверхностных вод [7–10, 15, 21, 24, 30]. Для многих типов гидрогеологических задач, особенно геоэкологической направленности, в которых гидрогеодинамические расчеты выполняются в стационарной (квазистационарной) постановке, вполне достаточно рассматривать поверхностные водоемы и водотоки в качестве границ гидрогеологических объектов, не раскрывая динамику их водного баланса. Взаимосвязь грунтовых вод с атмосферой через зону аэрации осуществляется заданием инфильтрационного питания. В такой постановке задача сводится к математической модели геофильтрации, верхней границей которой является уровеньная поверхность грунтового водоносного горизонта, получающего инфильтрационное питание сверху и имеющего гидравлическую связь с поверхностными водоемами и водотоками, на которых задаются известные граничные условия. В наиболее общем случае в математических моделях взаимосвязи подземных и поверхностных вод, именуемых в дальнейшем для краткости моделями взаимосвязи, должна учитываться динамика как поверхностного, так и подземного стока, поскольку они являются тесно связанными компонентами гидрологического цикла.

В соответствии с работой [4] будем полагать, что инфильтрационный водообмен через зону аэрации осуществляется путем инфильтрации атмосферных осадков, испарения с депрессионной поверхности грунтовых вод и транспирации влаги растительностью. Алгебраическая сумма интенсивности инфильтрации и эвапотранспирации в каждой расчетной точке за рассматриваемый период представляет собой результирующую величину инфильтрационного питания. Связь грунтовых вод с поверхностными водоемами и водотоками реализуется через подрусловые отложения. Направленность и интенсивность процесса взаимодействия зависит от проницаемости подрусловых отложений и соотношения уровней грунтовых и речных вод.

В изложенной постановке для решения задачи по оценке результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод может быть использована методика, разработанная нами совместно с А. А. Плетневым [13, 14]. Суть методики заключается в задании над грунтовым (верхним) водоносным горизонтом фиктивной границы 3-го рода в виде слабопроницаемого слоя и водоема. В фиктивном водоеме задаются такие же напоры, как и в самом водоносном горизонте. Коэффициент перетока  $\chi_f$  фиктивного слабопроницаемого слоя между водоносным горизонтом и фиктивным водоемом выполняет роль коэффициента регуляризации, применяемого при решении некорректных задач по методу А. А. Тихонова. Его расчетное значение выбирается в зависимости от точности задаваемых на модели напоров. Идея задания фиктивной границы 3-го рода над грунтовым водоносным горизонтом с целью определения площадного питания подземных вод принадлежит А. А. Плетневу. Впервые она реализована в работе [13].

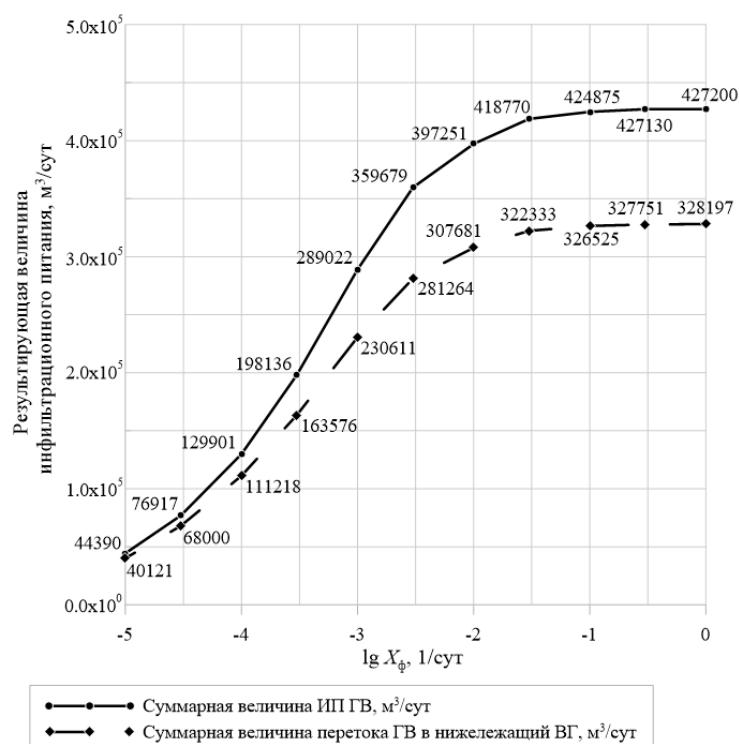
При воспроизведении на ЧГФМ стационарного (квазистационарного) режима фильтрации подземных вод суммарная величина притока в расчетный блок с водотоком  $Q_{b,i,j}$  в программе GWFS определяется выражением (3). Для естественного режима фильтрации  $Q_{d,i,j}$  и  $Q_{c,i,j}$  равны нулю, а родниковый сток  $Q_p$  расходуется на испарение или входит в виде составной части в речной сток, поэтому для рассматриваемого нами случая

$$Q_{b,i,j} = Q_{r,i,j} + Q_{w,i,j} \quad (4)$$

Результатом решения задачи в изложенной постановке являются расчетные величины питания грунтовых вод по каждому блоку модели, т. е. значения параметра  $Q_{b,i,j}$ , входящего в зависимости (2) и (3). Данный параметр представляет собой интегральную величину площадного (поблочного) питания грунтовых вод, которое (при заданных гидрогеологических параметрах и граничных

условиях) обеспечивает принятые к расчету уровни грунтовых вод. Проверка и уточнение полученных значений  $Q_{b,l,j}$  выполняется путем решения прямой геофильтрационной задачи. Для этого интенсивность инфильтрационного питания и эвапотранспирации, а также поверхностные водоемы и водотоки задаются на модели в явном виде. После решения задачи производится сравнение фактических и модельных напоров в контрольных точках или по всему полю модели.

**Результаты оценки результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод.** Первоначально, с целью определения оптимальной величины коэффициента перетока фиктивного слабопроницаемого слоя  $\chi_\phi$  (коэффициента регуляризации), нами проведена серия модельных экспериментов. Результаты расчетов, полученные при различных значениях  $\chi_\phi$ , показаны на рис. 9.



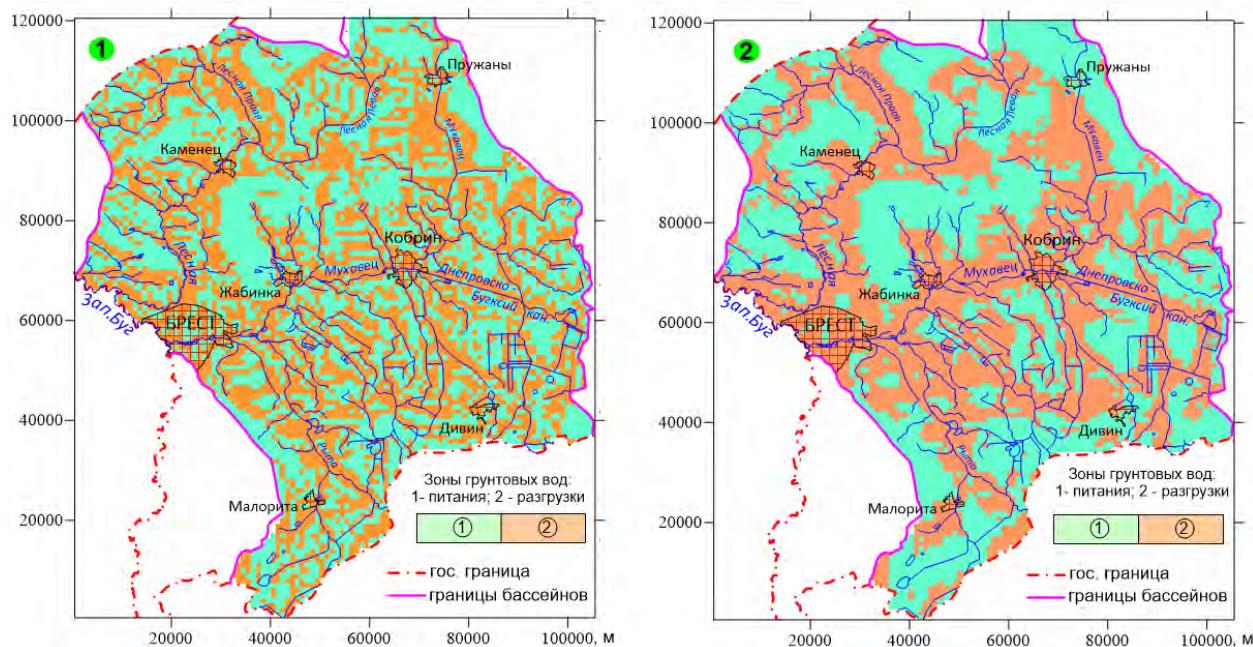
**Рис. 9. Зависимость результирующей величины питания подземных вод от коэффициента регуляризации фиктивного слабопроницаемого слоя**

**Fig. 9. Dependence of the resultant groundwater recharge value on the regularisation factor of the fictitious weakly permeable layer**

Как видно из рис. 9, результирующая величина питания грунтовых вод  $w_p$  зависит от принятого значения  $\chi_\phi$ , причем эта зависимость имеет логарифмический характер, что свидетельствует о слабой чувствительности  $w_p$  к значению коэффициента регуляризации. Так, при уменьшении  $\chi_\phi$  с 1,0 до 0,00001 1/сут (т. е. в 100 000 раз) расчетная величина питания грунтовых вод через верхнюю границу уменьшается лишь в 9,6 раза (с 427 200 до 44 390  $m^3/сут$ ). При этом сохраняются общие тенденции распределения участков питания и разгрузки грунтовых вод как по абсолютным величинам, так и по знаку (рис. 10).

Устойчивое и закономерное поведение результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод при широком диапазоне изменения коэффициента регуляризации дает основание относиться с высокой степенью доверия к предложенному подходу воспроизведения гидродинамических условий на верхней границе геофильтрационных моделей гидрогеологических объектов.

В заключение отметим, что под оптимальной величиной коэффициента регуляризации нами понимается такое значение, при котором на геофильтрационной модели получена приемлемая близость натурных и модельных критериев согласования. В нашем случае удовлетворительное совпадение фактических и модельных напоров грунтовых вод (практически по всей моделируемой области разница не превышает 1,0 м по модулю) получено при  $\chi_\phi = 0,01$  1/сут, а результирующая величина инфильтрационного питания и соответствующая ему величина разгрузки грунтовых вод в реки, включая эвапотранспирацию, равна 397 251  $m^3/сут$ . Из этого объема 307 681  $m^3/сут$  расходуется на питание ниже залегающего водоносного горизонта.



**Рис. 10. Распределение расчетных зон питания и разгрузки грунтовых вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец: 1 – при  $\chi_{\phi} = 0,01$  1/сут; 2 – при  $\chi_{\phi} = 0,0001$  1/сут**

**Fig. 10. Distribution of calculated groundwater recharge and discharge zones on the territory of the Lesnaya and Mukhavec river basins: 1 – at  $\chi_{\phi} = 0.01$  1/day; 2 – at  $\chi_{\phi} = 0.0001$  1/day**

Для проверки достоверности построенной модели инфильтрационное питание и гидрографическая сеть на ней воспроизведены в явном виде. Интенсивность инфильтрационного питания принята по результатам моделирования при  $\chi_{\phi} = 0,01$  1/сут. Фиктивная граница 3-го рода в форме слабопроницаемого слоя и водоема из модели удалена. Водоемы и водотоки, реализованные на модели как внутренние границы 3-го рода, показаны на рис. 8. Моделирование фильтрации подземных вод выполнено в стационарной постановке без воспроизведения работы инженерных сооружений (водозаборов, дренажей и т. д.). Для реализации перечисленных изменений создана рабочая модель под именем «lim-3wr». Составляющие водного баланса всей исследуемой территории, полученные по результатам моделирования, приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Баланс грунтовых и поверхностных вод бассейнов рек Лесная и Мухавец (по результатам моделирования после реализации на модели гидрографической сети в явном виде;  $\chi_{\phi} = 0,01$  1/сут)**

**Table 1. Groundwater and surface water balance in the Lesnaya and Mukhavec river basins (based on modelling results after implementation of the hydrographic network in the model;  $\chi_{\phi} = 0.01$  1/day)**

Составляющие баланса	Единица измерения		
	м <sup>3</sup> /сут	мм/год	л/с·км <sup>2</sup>
Результирующая величина инфильтрационного питания грунтовых вод	376 588	17,59	0,558
Питание грунтовых вод из блоков с реками	20 663	0,96	0,031
Результирующая величина разгрузки грунтовых вод в реки	189 595	8,85	0,281
Результирующая величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	207 659	9,70	0,308
Нисходящий переток в соседний водоносный горизонт	307 675	14,37	0,456

Некоторые из результатов, представленных в табл. 1, обращают на себя внимание.

1. Результирующие величины разгрузки грунтовых вод в реки, с одной стороны, и в форме эвапотранспирации, с другой стороны, соизмеримы между собой.

2. Также соизмеримы нисходящий переток воды в соседний водоносный горизонт ( $307\ 675\ м^3/сут$ ) и результирующая величина инфильтрационного питания грунтовых вод ( $376\ 588\ м^3/сут$ ); другими словами, вертикальная фильтрация преобладает над латеральной.

3. Результирующая величина разгрузки грунтовых вод в реки ( $0,281\ л/с\cdotкм^2$ ), по сравнению с имеющимися данными по подземному стоку в реки ( $1,4\ л/с\cdotкм^2$ ), меньше в 5 раз.

По приведенным в табл. 1 результатам также возникают вопросы: 1) как объяснить аномально низкие значения результирующих величин инфильтрационного питания и разгрузки грунтовых вод?; 2) если полученный результат является достаточно надежным, то что он собой характеризует в свете современных представлений об инфильтрационном водообмене и его роли в формировании естественных ресурсов подземных вод? В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть состояние проблемы оценки инфильтрационного питания грунтовых вод. Стоит также подчеркнуть, что геолого-гидрогеологическая изученность водосборов рек Лесная и Мухавец и достоверность гидрологических параметров, принятых в ЧГФМ «LiM», достаточно высокие, а при моделировании достигнута очень высокая степень сходимости модельных и фактических уровней грунтовых вод.

Таким образом, на ЧГФМ «lim-3wr» получена хорошая сходимость заданных и модельных напоров грунтовых вод – намного меньше реальной величины ошибок в исходных данных. Однако высокой степени согласования фактических и модельных уровней оказалось недостаточно для получения на модели приемлемой величины подземного стока в реки. Ранее похожие результаты были опубликованы И. С. Пашковским [7, с. 1]. При этом авторы [7] обращают внимание на то, что игнорирование процессов разгрузки подземных вод эвапотранспирацией при неглубоком залегании их уровня (на площади пойм и низовых болотных массивов) приводит к занижению расчетных значений питания подземных вод. Для бассейнов рек Лесная и Мухавец как раз и характерны низкая степень дренированности и широкое развитие разноплощадных болотных массивов. Надо полагать, что заниженная величина подземного стока в реки, полученная нами, вполне укладывается в известные представления по рассматриваемой проблеме.

Ответ на полученный нами результат содержится в статье С. П. Позднякова с соавторами [23, с. 122]: «Осадки за холодный период года с осени до весны формируют (за счет осенних дождей, зимних оттепелей и весеннего снеготаяния) впитывание влаги в почву и ее нисходящее движение. Это движение корреспондируется с подъемом внутригодового гидрографа уровней грунтовых вод с разными скоростями. Наибольшая скорость подъема начинается с марта – апреля и это реакция на весенне снеготаяние в феврале – первой декаде апреля. Летний спад уровней грунтовых вод связан с тем, что в теплый период года две составляющие суммарной эвапотранспирации существенно превышают выпадающие в это время осадки. Происходит иссушение почвенного слоя, вызывающее вертикальную миграцию влаги снизу вверх, в том числе и с уровня грунтовых вод. При этом, по-видимому, главную роль в снижении уровня грунтовых вод играет транспирация».

Таким образом, в среднемноголетнем разрезе на территории разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией, инфильтрационное питание в весенне-летний период не проявляет себя в явном виде как основной источник естественных ресурсов подземных вод. Однако именно в весенне-летний период на пойменных территориях, низких террасах и других ландшафтах, прилегающих к речным долинам, формируется значительная часть естественных ресурсов грунтового водоносного горизонта. В противном случае уровни грунтовых вод и речной сток на период летне-осенней межени были бы значительно ниже фиксируемых в реальности.

Среднегодовые или меженные уровни грунтовых вод и речной сток в многолетнем разрезе содержат в скрытом виде информацию о суммарной величине естественных ресурсов, которые формируются за счет быстрого (из зоны эвапотранспирации) и медленного (со стороны водораздельных пространств) добегания грунтовых и межпластовых вод к руслам рек.

Следует также отметить роль рельефа, и в особенности микрорельефа, в формировании инфильтрационного питания грунтовых вод. В расчетных блоках модели большой площади (в нашем случае –  $1,0\ км^2$ ) может быть сразу несколько участков, имеющих как положительные (просачивание атмосферных осадков в грунтовый водоносный горизонт), так и отрицательные (эвапотранспирация, разгрузка в поверхностные водоисточники) значения величины инфильтрационного питания. В итоге среднемноголетняя результирующая величина инфильтрационного питания грунтовых вод в пределах одного расчетного блока модели может быть положительной, отрицательной или близкой к нулю. Очевидно, что для воспроизведения на модели положительных и отрицательных величин инфильтрационного питания грунтовых вод в явном виде шаг сетки должен быть соизмерим с размерами участков инфильтрационного питания (+) и разгрузки грунтовых вод в реки или в форме эвапотранспирации (-).

**Состояние проблемы количественной оценки инфильтрационного водообмена.** Глубокий анализ состояния проблемы количественной оценки инфильтрационного водообмена (ИВО) и его роли в формировании подземных вод гидролитосферы сделан И. К. Гавич еще в 1995 г. [4]. Основной характеристикой инфильтрационного водообмена подземных вод с окружающей средой является многолетнее результирующее инфильтрационное питание  $w_p$ . И. К. Гавич подчеркивает, что в гидрогеологической науке проблема изучения и оценки инфильтрационного питания (ИП) подземных вод

всегда была одной из главных и получила свое развитие в таких основополагающих научных разделах гидрогеологии, как динамика подземных вод, режим и баланс подземных вод, влагоперенос в зоне аэрации. В работах Г. Н. Каменского, П. А. Киселева, Н. Н. Биндемана, Н. Н. Веригина, М. А. Вевиоровской, Н. А. Мясниковой, И. С. Пашковского, В. М. Шестакова и других были разработаны теоретические основы количественного изучения и оценки основных гидродинамических характеристик режима и баланса подземных вод, в частности, ИП зоны интенсивного водообмена, главным образом, применительно к природно-техногенным гидрогеологическим системам на базе детерминированного подхода. Все эти разработки предназначались для локальных объектов и использовались как методологическая основа при обработке данных наблюдений за режимом и балансом подземных вод на детальных стадиях изысканий [4].

Значительный прогресс в проблеме изучения ИП и других элементов баланса подземных вод был достигнут в 1970–80-е годы, когда в гидрогеологии активно стали развиваться исследования, связанные с изучением перемещения влаги в зоне аэрации на основе общей теории влагопереноса в пористой среде. А. Б. Ситниковым, И. Е. Жерновым, Б. А. Файбишенко, И. С. Пашковским, В. Н. Чубаровым и другими были разработаны теоретические подходы к исследованию процессов движения влаги в зоне аэрации на основе теории влагопереноса применительно к решению гидрогеологических задач (в том числе к определению ИП), а также технологическая база для постановки и проведения соответствующих экспериментальных работ на специальных водно-балансовых площадках. Все подходы к изучению и оценке ИП разрабатывали в основном на локальном уровне применительно к детальным исследованиям. В какой-то мере такое положение объяснимо трудностями регионального изучения ИВО из-за несоответствия вертикальных мощностей зон аэрации и насыщения, а также малостью величины ИП и существующей неясностью в оценке ее физической сущности и многолетних изменений.

Широкое применение методов математического моделирования и создание моделей локальных и региональных объектов несколько улучшило состояние проблемы количественной оценки ИВО, но не позволило решить задачу изучения и оценки многолетних изменений ИВО как элемента глобально-регионального круговорота влаги. И. К. Гавич связывает это с несколькими причинами. Так, при решении региональных задач, особенно при оценке ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод артезианского бассейна, крупного водопонижения при разработке глубоко залегающих полезных ископаемых, грунтовый водоносный горизонт на модели не воспроизводился, а задавался в виде граничного условия 3-го рода. Тем самым терялась важная информация, исключалось исследование режима и баланса грунтовых вод, условий их формирования, оценки их роли в общем водообмене подземных вод с окружающей средой [4, с. 2].

Для определения ИП по данным режимных наблюдений используются оценки водного баланса на поверхности земли, режима влажности в зоне аэрации, режима уровней грунтовых вод, подземного стока. Их подробной характеристике посвящено большое количество публикаций [4, 15, 31 и др.]. Методы, основанные на изучении формирования процесса инфильтрации на поверхности земли и в зоне аэрации, имеют ряд ограничений, что обуславливает особый интерес к методам, опирающимся на данные режима уровней и расходов грунтовых вод [31].

В результате глубокого анализа состояния проблемы И. К. Гавич [4] приходит к выводу, что в качестве характеристики ИВО подземных вод с окружающей средой следует принимать многолетнее результирующее инфильтрационное питание  $w_p$ , представляющее собой некоторую сумму приходно-расходных элементов за принятый период времени (алгебраическую сумму интенсивности инфильтрационного питания и испарения с депрессионной поверхности грунтовых вод за год или многолетний период). Одновременно величина  $w_p$  является в определенной мере альтернативой подземному стоку речного бассейна и характеризует многолетние естественные ресурсы подземных вод региона. Показатель  $w_p$  является ведущим в описании процесса формирования подземных вод, поэтому необходима разработка независимых методов его оценки для ЗАВ. Результирующую величину ИП можно определять по формулам стационарной фильтрации, используя значения среднегодовых уровней грунтовых вод [4].

Ввиду отсутствия надежного регионального метода оценки ИВО И. К. Гавич [4] предлагает свою концепцию анализа современного состояния грунтовых вод крупных территорий на основе использования многолетних режимных наблюдений. В рамках данной концепции ею разработан ландшафтно-гидрогеологический метод (ЛГМ) оценки многолетнего результирующего ИП. Метод базируется на основе ряда принципов и подходов, применяемых в естественных науках, а также на представлениях о квазистационарном режиме подземных вод крупных природных и природно-техногенных гидрогеологических систем. Суть его заключается в необходимости выявления региональных закономерностей формирования режима и баланса подземных вод в пределах однородной ландшафтно-географической зоны по всей совокупности отдельных точечных характеристик процесса, т. е. зонально усредненных данных.

В. М. Шестаковым в работе [31] излагается метод оценки ИП по данным площадной наблюдательной сети при стационарном режиме грунтового потока. Предполагается, что корректное решение задачи возможно при задании зонного распределения инфильтрации по площади потока, обусловленного геоморфологической, ландшафтной и водохозяйственной обстановками. Исходными в этой задаче

являются данные о напорах в наблюдательных скважинах и расположение зон с кусочно-постоянными значениями интенсивности инфильтрации. В таких условиях оценка зонных значений интенсивности инфильтрации осуществляется методом моделирования с использованием функций влияния.

На наш взгляд, методический подход [4, 31], основанный на выделении зон с кусочно-постоянными значениями интенсивности инфильтрации, не лишен недостатков. Ведущие российские гидро-геологи считают доказанным, что ИП грунтовых вод очень сильно изменяется по площади даже в пределах единых морфоструктурных элементов рельефа и смежных участков территории [1 и др.]. Сам В. М. Шестаков подчеркивает [31], что для инфильтрации характерна значительная площадная неравномерность масштаба десятков и сотен метров, обусловленная в основном неровностями рельефа и изменчивостью почвенно-ландшафтных условий. В связи с этим выделение более-менее однородных зон с характерными значениями ИП является весьма проблематичным.

Ландшафтно-гидрогеологический метод, на наш взгляд, имеет и другие недостатки. В частности, данный подход предполагает комплексное использование известных методов количественной оценки закономерностей питания подземных вод в зависимости от различных режимообразующих факторов. В таком случае недостатки данных методов частично или полностью относятся и к ЛГМ. Так, И. К. Гавич предлагает оценку исходных значений результирующей величины ИП производить по формулам стационарной фильтрации, которые получены для изолированного снизу водоносного горизонта, т. е. подстилаемого непроницаемой границей. Для гидрогеологических объектов, состоящих из нескольких гидравлически связанных водоносных горизонтов, расчеты по данным формулам дают не величину  $i_F$ , а разность между интенсивностью ИП и интенсивностью перетока в соседний водоносный горизонт.

Для использования ЛГМ на практике требуются весьма длительные ряды наблюдений и высокая плотность точек наблюдения по площади. В противном случае районирование региона по ведущим режимообразующим факторам формирования режима и баланса подземных вод теряет смысл. Так, при апробации ЛГМ на примере Восточно-Предкавказского артезианского бассейна в среднем на одну расчетную точку приходилось более 1000 км<sup>2</sup> исследуемой территории [4]. Достаточность такого объема исходных данных для выделения зонально усредненных характеристик ИВО вызывает сомнения. Например, наши оценки по детально изученному объекту, расположенному на водоразделе рек Сож и Уза, показывают, что на территории площадью всего 9 км<sup>2</sup> выделяется несколько участков питания и разгрузки грунтовых вод [13, 14].

В последние годы проблема оценки ИП подземных вод детально рассмотрена в работах С. О. Гриневского и С. П. Позднякова [7–10]. По их мнению, наиболее перспективен комплексный подход на основе моделирования процессов формирования ИП в рамках геогидрологической водноводобалансовой модели. Под геогидрологической моделью понимается совокупность моделей трансформации и переноса влаги внутри геогидрологического цикла, объединенных условиями сохранения общего водного баланса на его внутренних границах. Расчетная модель формирования ИП подземных вод состоит из двух взаимосвязанных блоков – трансформации осадков на поверхности земли и влагопороноса в зоне аэрации. В первом блоке проводится расчет трансформации осадков на поверхности земли с учетом их задержки растительностью и испарения, накопления в виде снега, таяния и образования поверхностного стока. Для оценки водообмена в зоне аэрации моделируется одномерная вертикальная насыщенно-ненасыщенная фильтрация от поверхности земли до нижней границы, расположенной на уровне глубины залегания грунтовых вод. Использование таких моделей для оценки ИП и естественных ресурсов подземных вод в среднем (1 : 25 000–1 : 50 000) и региональном (1 : 100 000–1 : 200 000) масштабах предполагает проведение районирования исследуемой территории по комплексу метеорологических, ландшафтных, геолого-почвенных и гидрогеологических факторов [7, с. 1; 10, с. 46]. Природное сочетание основных факторов формирования ИП образует совокупность своеобразных типов условий, для которых проводится геогидрологическое моделирование, позволяющее количественно охарактеризовать элементы баланса влаги на поверхности земли и в зоне аэрации и ИП подземных вод. Оцененные таким образом величины питания распространяются далее на площади с идентичными метеоклиматическими, ландшафтными, геолого-почвенными и гидролого-гидрогеологическими условиями на поверхности речных бассейнов, выделенные на основе соответствующего районирования территории [7, с. 5].

Обратим внимание на два аспекта задачи, решаемой в работах [7, 10]: с одной стороны, реализация методических подходов, предложенных С. О. Гриневским и С. П. Поздняковым, в численных моделях реальных гидрогеологических объектов является весьма сложной задачей; с другой стороны, авторы [7, 10] уходят от прямого учета морфологии рельефа в моделях взаимосвязи. Их ссылки на то, что роль макроформ рельефа в процессах формирования инфильтрации нивелируется характером растительности и микрорельефом поверхности, а роль отдельных западин и микропонижений не может быть отражена в региональном масштабе исследований, выглядят не весьма убедительно. Если роль западин и микропонижений велика (следовательно, они влияют на региональный результат), то можно ли доверять результатам моделирования, полученным без их учета. Важнейшая роль микрорельефа в формировании инфильтрационного питания грунтовых вод убедительно показана в работе В. М. Шестопалова с соавторами [32].

Вместе с тем следует согласиться с мнением авторов [7] о том, что для оценки инфильтрации наиболее перспективным является комплексный подход на основе совместного использования балансового, гидролого-гидрогеологического методов и моделирования процессов формирования инфильтрационного питания в рамках геогидрологической воднобалансовой модели. В рамках комплексного подхода могут быть полезны и наши предложения по оценке некоторых элементов инфильтрационного водообмена.

**Балансово-гидродинамический метод оценки инфильтрационного водообмена.** В настоящее время практически всеми признано, что калибрация геофильтрационных моделей должна базироваться на согласовании не только натурных и модельных уровней грунтовых вод, но и подземного стока в реки. На созданной нами ЧГФМ водосборов рек Лесная и Мухавец получена очень хорошая сходимость заданных и модельных напоров грунтовых вод – намного меньше реальной величины ошибок в исходных данных. Однако высокой степени согласования фактических и модельных уровней оказалось недостаточно для получения на модели приемлемой величины подземного стока в реки.

Результирующая величина ИП получена нами при моделировании фильтрации подземных вод в стационарной постановке. Суммарная величина притока  $Q_{b,i,j}$  в расчетный блок с водотоком (далее – «речной» блок, или блок с рекой), т. е. для первого от поверхности водоносного горизонта (расчетного водоносного пласта модели) в ВП GWFS определяется выражениями (3) и, в нашем случае, (4).

Инфильтрационное питание реализуется на основе зависимости

$$Q_{w,i,j} = w_{i,j} \Delta X_i \Delta Y_j, \quad (5)$$

где  $w_{i,j}$  – интенсивность инфильтрационного питания в пределах расчетного блока модели с координатами  $i, j$ ;  $\Delta X_i$  и  $\Delta Y_j$  – размеры блока по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Взаимосвязь грунтовых вод с поверхностными водотоками воспроизводится в соответствии с выражением

$$Q_{r,i,j} = T_{r,i,j} (H_{r,i,j} - H_{i,j}), \quad (6)$$

где  $H_{r,i,j}$  и  $H_{i,j}$  – абсолютные отметки уровней воды в реке и в грунтовом водоносном горизонте соответственно;  $T_{r,i,j}$  – проводимость подрусловых отложений, причем

$$T_{r,i,j} = \chi_{r,i,j} N_{r,i,j} L_{r,i,j}, \quad (7)$$

где  $\chi_{r,i,j}$  – коэффициент взаимосвязи водотока с подземными водами ( $\chi_{r,i,j} = k_{r,i,j} / m_{r,i,j}$ , где  $k_{r,i,j}$  и  $m_{r,i,j}$  – коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемых подрусловых отложений соответственно);  $N_{r,i,j}$  и  $L_{r,i,j}$  – ширина и длина русла реки в пределах расчетного блока модели соответственно.

При отсутствии на территории моделируемой области водотоков  $Q_{r,i,j} = 0$ , поэтому согласно зависимости (4)  $Q_{w,i,j} = Q_{b,i,j}$ . В таком случае интенсивность инфильтрационного питания  $w_{i,j}$  в пределах расчетного блока модели с координатами  $i, j$  вычисляется по выражению (5). При наличии на модели водотоков рассматриваемая задача становится сложнее, так как согласно (4) возникает необходимость расчленения модельного притока в блок  $Q_{b,i,j}$  на две составляющие – расход грунтовых вод в поверхностные водотоки  $Q_{r,i,j}$  и инфильтрационный расход грунтовых вод  $Q_{w,i,j}$ . Для моделей с небольшим шагом сеточной области, когда размеры блоков и водотоков (в пределах блока) соизмеримы, величиной  $Q_{w,i,j}$  в зависимости (4) можно пренебречь и полагать, что  $Q_{b,i,j} = Q_{r,i,j}$ , т. е. весь модельный приток в блок относится к расходу реки в пределах блока. Если малых водотоков много, а шаг сетки большой, то значимость инфильтрационного питания (или эвапотранспирации) грунтовых вод  $Q_{w,i,j}$  по блокам с реками в общем балансе системы существенно возрастает. В таком случае требуется независимое определение  $Q_{w,i,j}$ .

Для слабодренированных территорий раздельная оценка  $Q_{r,i,j}$  и  $Q_{w,i,j}$  возможна при выполнении следующих условий:

1) все реки и водоемы дренируют грунтовый водоносный горизонт, т. е. в естественных условиях имеет место подпертый режим фильтрации подземных вод (для Белорусского Полесья это положение выполняется всегда);

2) подземный сток в реки ( $Q_{\text{пср}}$ ) определен независимым способом;

3) карта гидроизогипс (или глубин залегания грунтовых вод) отвечает стационарному (квазистационарному) режиму фильтрации;

4) модельный расход грунтовых вод в реки равен натурному подземному стоку; для водосборов рек Лесная и Мухавец по [3]  $Q_{\text{пср}} = 1,4-1,6 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$  (для гидрологических расчетов принято  $Q_{\text{пср}} = 1,4-1,6 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ );

5) между  $Q_{w,i,j}$  и  $Q_{b,i,j}$  имеется линейная связь:

$$Q_{w,i,j} = \alpha Q_{b,i,j} + \beta, \quad (8)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты уравнения прямой линии, единые для всех блоков с реками и блоков с отрицательными значениями результирующей величины ИП. Линейная связь между  $Q_{w,i,j}$  и  $Q_{b,i,j}$  является достаточно очевидной, так как площадь русла реки намного меньше площади расчетного блока. В нашем случае (при площади расчетного блока модели с рекой 1,0 км<sup>2</sup>, ширине реки 50 м и ее длине 1000 м) площадь реки в пределах блока составляет лишь 5 %.

Отметим, что суммарный расход блока  $Q_{b,i,j}$  может принимать как положительные ( $Q_{b,i,j}^+$  – приток воды в пласт), так и отрицательные ( $Q_{b,i,j}^-$  – эвапотранспирация, разгрузка грунтовых вод в реки) значения. Составляющие баланса принимаются со знаком «+» при поступлении воды в пласт. Расход грунтовых вод в реки ( $Q_{r,i,j}$ ) имеет только отрицательные значения, которые согласно (4) стремятся к нулю при  $Q_{b,i,j} = Q_{w,i,j}$ , т. е. для таких расчетных блоков максимальный расход ( $Q_{b,max}$ ) также равен нулю. Возможно и обратное направление процесса – приток воды в пласт из реки, но в этом случае река («речной» блок) не участвует в формировании общего подземного стока в реки.

Условие о том, что все реки и водоемы дренируют грунтовый водоносный горизонт, т. е. в естественных условиях имеет место подпертый режим фильтрации подземных вод, справедливо для меженного периода. В весенне-летний период грунтовый водоносный горизонт (первый от поверхности водоносный пласт) становится областью питания на всей площади своего распространения. Питание формируется за счет как талых вод, так и атмосферных осадков в этот период.

При известном значении  $Q_{b,i,j}$  условие (8) позволяет найти  $Q_{w,i,j}$ . Значение  $\beta$  можно найти из выражения (8), приняв  $Q_{w,i,j} = 0$  при  $Q_{b,i,j} = Q_{b,max}$ :

$$\beta = -\alpha Q_{b,max}, \quad (9)$$

где  $Q_{b,max}$  – максимальное значение модельного притока в блок из числа всех блоков с реками. В блоках с отрицательной величиной результирующего инфильтрационного питания  $Q_{b,max}$  стремится к нулю, поэтому для решения уравнения (8) можно принять условие, что  $Q_{b,max} = 0$ , соответственно,  $\beta = 0$ . Для принятых граничных условий уравнение (8) приобретает вид:

$$Q_{w,i,j} = \alpha Q_{b,i,j}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (4) при  $\beta = 0$  и имея в виду, что для зоны разгрузки грунтовых вод в форме эвапотранспирации  $Q_{w,i,j} = Q_{et,i,j}^*$ , а для блоков с реками  $Q_{r,i,j} = Q_{r,i,j}^*$ , получим:

$$Q_{r,i,j}^* = (1 - \alpha) Q_{b,i,j}, \quad (11)$$

$$Q_{et,i,j}^* = (1 - \alpha) Q_{b,i,j}, \quad (12)$$

где  $Q_{r,i,j}^*$  и  $Q_{et,i,j}^*$  – суммарный расход грунтовых вод с учетом внутригодовых изменений инфильтрационного питания в реки и в форме эвапотранспирации соответственно.

Такой подход, на наш взгляд, является обоснованным, так как расчетные блоки с реками и зона разгрузки грунтовых вод в форме эвапотранспирации представляют собой единую область, однородную по условиям питания и разгрузки грунтовых вод.

Имея в виду, что  $\sum Q_{r,i,j} = Q_{ncp}$ , определим значение  $(1 - \alpha)$ :

$$\sum Q_{r,i,j} = \sum (1 - \alpha) (Q_{b,i,j}) = (1 - \alpha) \sum (Q_{b,i,j}) = Q_{ncp}, \quad (13)$$

$$1 - \alpha = \frac{Q_{ncp}}{\sum (Q_{b,i,j})}. \quad (14)$$

На основе установленных значений  $(1 - \alpha)$ ,  $\beta$  и  $Q_{b,i,j}$  по зависимости (11) вычислим суммарный расход  $(Q_{r,i,j}^*)$  грунтовых вод в реки и далее по формуле (4) оценим интенсивность инфильтрационного питания по расчетным блокам модели с реками:

$$Q_{w,i,j}^* = Q_{b,i,j} - Q_{r,i,j}^*. \quad (15)$$

Аналогично – для зоны разгрузки грунтовых вод в форме эвапотранспирации (суммарного испарения):

$$Q_{w,i,j} = Q_{b,i,j} - Q_{et,i,j}^*. \quad (16)$$

**Калибрация численной геофильтрационной модели «LiM».** Калибрация ЧГФМ водосборов рек Лесная и Мухавец заключалась в получении на модели заданной величины подземного стока в реки и согласовании модельных и фактических напоров грунтовых вод на период летне-осенней межени путем определения инфильтрационного питания и проводимости подрусловых отложений. Карта гидроизогипс, принятая к расчетам, показана на рис. 6. Значения модуля подземного стока в реки на территории моделируемых водосборов равны в среднем 1,4–1,6 л/с·км<sup>2</sup> [3] (для расчетов принято значение 1,4 л/с·км<sup>2</sup>).

Проблемы создания карты гидроизогипс и определения модуля подземного стока заданной обеспеченности, а также их согласование в данной статье не рассматриваются, так как это отдельная и весьма сложная задача. Гидрологические параметры водоносных горизонтов и слабопроницаемых слоев в процессе калибрации модели также не корректируются. Это означает, что все ошибки в расчетах, обусловленные недостоверностью уровенной поверхности грунтовых вод и гидрологических параметров, относятся к расчетным величинам инфильтрационного питания грунтовых вод и подземного стока в реки. В свою очередь, количественные значения последних считаются приемлемыми, если на модели получена удовлетворительная величина подземного стока в гидографическую сеть.

Таким образом, после согласования фактических и модельных уровней грунтовых вод (1-й этап калибрации модели) необходимо согласовать фактическую (принятую к расчетам) и модельную величину подземного стока в реки (2-й этап калибрации). Для решения этой задачи воспользуемся балансово-гидродинамическим подходом оценки инфильтрационного водообмена. Для расчетов использована ЧГФМ «lim-2wr», в которой реки и результирующая величина инфильтрационного питания на водосборах рек Лесная и Мухавец реализованы в явном виде: реки – в форме границ 3-го рода; интенсивность инфильтрационного питания – в виде границы 2-го рода, т. е. количества воды (м/сут), поступающего на уровенную поверхность грунтовых вод в каждый расчетный блок модели без рек.

С учетом перечисленных изменений выполнено моделирование фильтрации подземных вод. В итоге получены количественные значения результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод (рис. 11).

Расчленение модельного притока в речные блоки  $Q_{b,i,j}$  на расход грунтовых вод в поверхностные водотоки  $Q_{r,i,j}$  и инфильтрационное питание грунтовых вод  $Q_{w,i,j}$  выполним по формулам (10)–(16). Приняв модуль подземного стока равным 1,4 л/с·км<sup>2</sup> ( $1,2 \cdot 10^{-4}$  м/сут), площадь моделируемых водосборов – 7816 км<sup>2</sup>, получим общий подземный сток в реки  $Q_{\text{пср}} = 944\ 344$  м<sup>3</sup>/сут. На модели «lim-3wr» приток к «речным» блокам составил 189 595 м<sup>3</sup>/сут. Согласно (8)  $\alpha = 944\ 344 / 189\ 595 = 4,98$ . При известных значениях  $\alpha$  и  $Q_{b,i,j}$  по зависимостям (15) и (16) можно оценить инфильтрационный расход по блокам с  $w_p < 0$ .

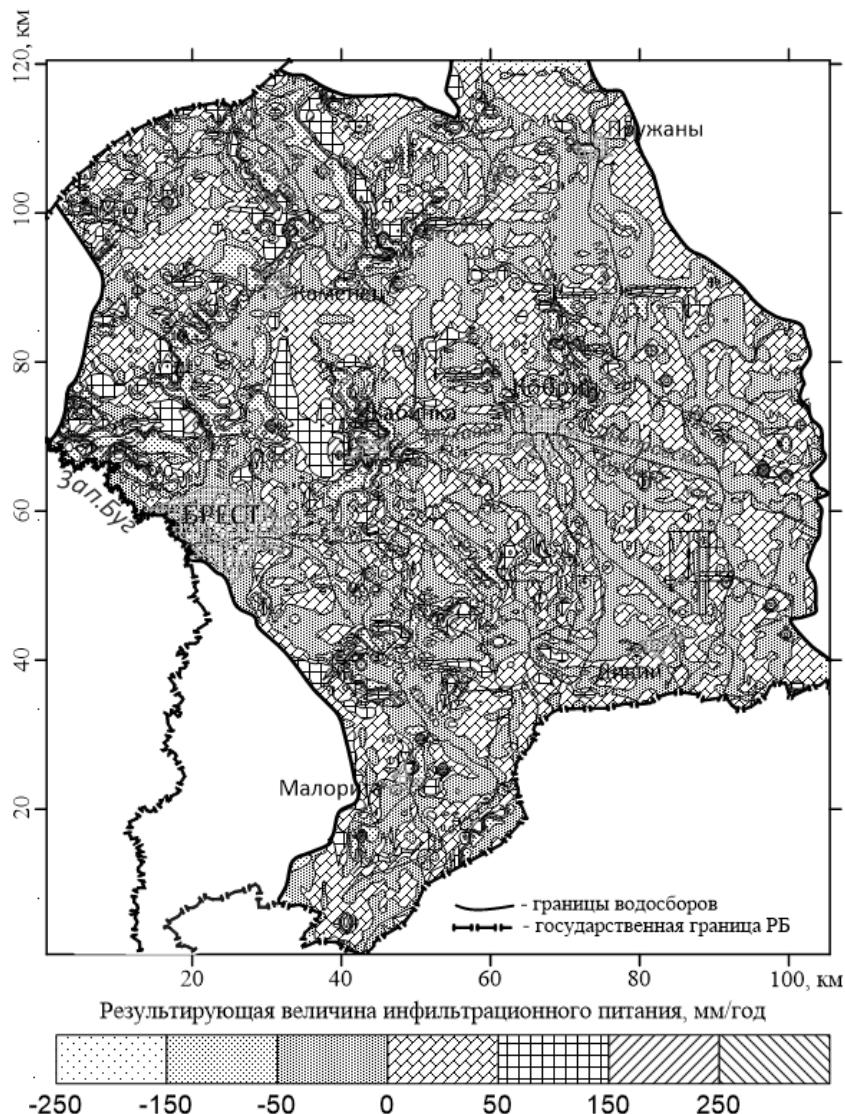
**Реализация гидродинамических условий на верхней границе модели «LiM».** Для решения данной задачи создана рабочая версия ЧГФМ под именем «lim-4wrd». По результатам 1-го этапа калибрации ЧГФМ «LiM» на верхней границе моделируемой области выделено три вида расчетных блоков. По направленности процесса движения воды между верхней границей модели и грунтовым водоносным горизонтом все расчетные блоки подразделяются на две группы – с положительной и отрицательной величиной результирующего инфильтрационного питания.

В свою очередь, блоки с отрицательной величиной результирующего питания также подразделяются на две группы (подгруппы) – с реками и без рек. В соответствии с выделенными группами расчетных блоков моделируемая территория подразделяется на три зоны (участка):

1-я зона – территория, на которой в среднемноголетнем разрезе формируется результирующая величина питания грунтовых вод с положительным знаком (+w);

2-я зона – территория, на которой в среднемноголетнем разрезе преобладает эвапотранспирация грунтовых вод (−w);

3-я зона – территория, которую занимает речная сеть, включая часть пойм, низких террас и других отрицательных форм рельефа, входящих в расчетные блоки с реками.



**Рис. 11. Карта результирующей величины инфильтрационного питания после согласования фактических и модельных уровней грунтовых вод (по результатам моделирования)**

**Fig. 11. Map of the resulting infiltration supply after matching actual and model groundwater levels (based on modelling results)**

Расчетные блоки (ячейки) 1-й зоны тяготеют к водоразделам и другим повышенным элементам рельефа. Среднемноголетняя величина ИП здесь всегда положительна. В разрезе года испарение влаги с депрессионной поверхности ГВ практически отсутствует. Направление движения влаги в зоне аэрации нисходящее. Возможно и восходящее движение, но влага, не достигшая свободной поверхности ГВ, не участвует в формировании подземного стока в реки и уровенного режима ГВ, поэтому в наших задачах данный тип воды не рассматривается.

Интенсивность ИП в расчетных блоках 1-й зоны, определенная в процессе 1-го этапа калибровки модели «LiM», на ЧГФМ задается в виде границы 2-го рода, т. е. количества воды (м/сут), поступающего на уровенную поверхность ГВ.

Отличие 2-й зоны состоит в том, что на ее территории в годовом разрезе имеет место не только эвапотранспирация, но и ИП с положительным знаком. Важно, что эвапотранспирация преобладает над ИП как в годовом, так и в многолетнем разрезе. Однако периодическое питание грунтовых вод в течение года имеет существенное значение в формировании общей величины естественных ресурсов подземных вод. Поэтому в части речного бассейна с отрицательной величиной результирующего питания грунтовых вод требуется раздельная оценка как положительной, так и отрицательной составляющей.

В модели «lim-4wrd» для реализации среднемноголетней величины эвапотранспирации использована система дренажа, возможность воспроизведения которого имеется в вычислительной программе GWFS. На модели «lim-4wrd» дрены заложены во всех ячейках без рек с отрицательным результирующим питанием. Глубина дрен – 1,0 м. В дренах сохранены уровни ГВ, принятые на 1-м этапе калибрации модели. Блоковая проводимость дренажных сооружений стремится к бесконечности (на модели задано  $T_d = 9999 \text{ м}^2/\text{сут}$ ). Стоить отметить, что моделировать эвапотранспирацию во 2-й зоне можно было с использованием рек в виде границ 3-го рода. Замена рек на дренаж сделана для того, чтобы расчетные блоки модели по 2-й и 3-й зонам различались формой выдачи результатов моделирования, что удобнее для их анализа и обработки.

В вычислительной программе GWFS моделирование системы горизонтального дренажа и воспроизведение притока подземных вод к дренам  $Q_d$  описывается зависимостью [15]:

$$Q_d = T_d (H_d - H_*), \quad (17)$$

где  $T_d$  – блоковая проводимость дренажных сооружений;  $H_d$  – абсолютная отметка уровня воды в дрене;  $H_*$  – абсолютная отметка уровня воды в водоносном горизонте.

Основная особенность 3-й зоны – это наличие гидрографической сети. В годовом разрезе, как и во 2-й зоне, имеет место не только эвапотранспирация, но и ИГ грунтовых вод. На 2-м этапе калибрации гидрографическая сеть сохраняется в прежнем виде. Для воспроизведения среднегодовой величины инфильтрационного питания ГВ на площади распространения 2-й и 3-й зон задается граница 2-го рода по схеме, принятой для 1-й зоны.

Количественные значения среднегодовой величины инфильтрационного питания по каждому блоку 2-й и 3-й зон вычисляются по формулам (15) и (16) и затем вводятся в модель.

**Особенности формирования структуры баланса естественных ресурсов подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец.** Модельные величины всех составляющих баланса грунтовых и поверхностных вод, полученные в результате решения прямой геофiltрационной задачи, приведены в табл. 2.

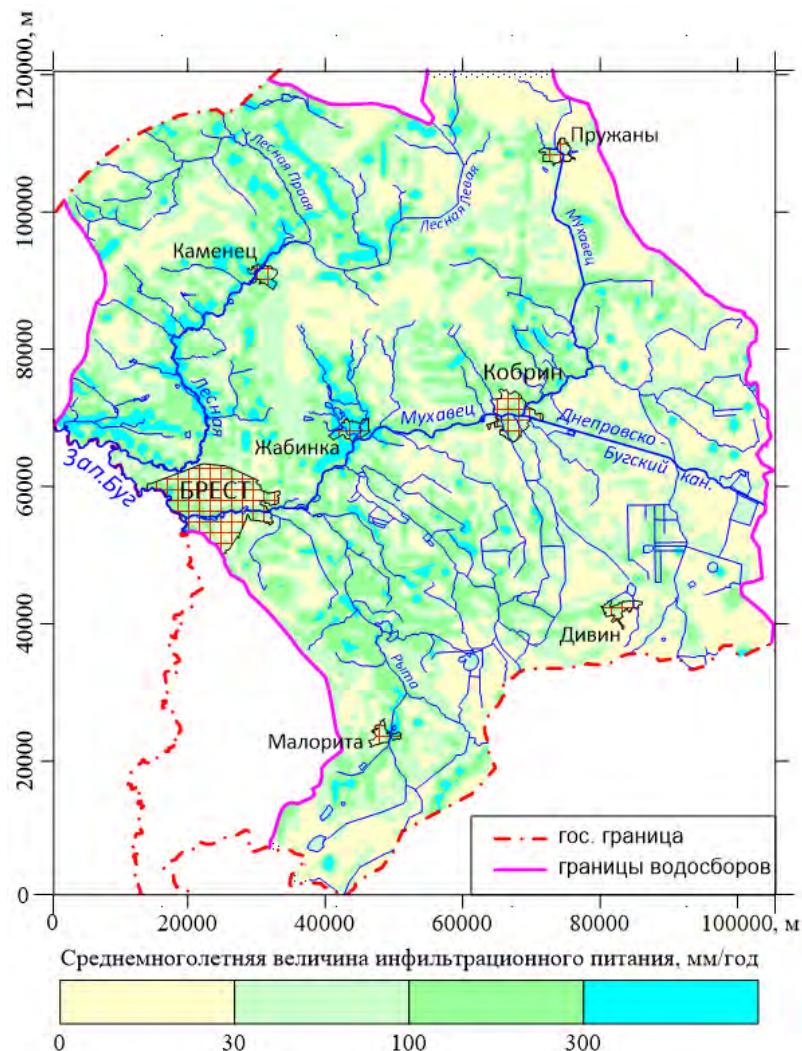
**Таблица 2. Общая структура баланса грунтовых, межпластовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец после согласования исходной и модельной величины подземного стока в реки (по результатам расчетов и моделирования)**

**Table 2. General structure of groundwater, interstratum and surface water balance in the territory of the catchments of the Lesnaya and Mukhavec rivers after agreement of initial and modelled values of groundwater flow into the rivers (based on the results of calculations and modelling)**

Составляющие баланса	Единица измерения		
	м <sup>3</sup> /сут	мм/год	л/с·км <sup>2</sup>
Суммарная величина инфильтрационного питания ГВ	1 978 315	92,39	2,9329
Суммарная величина питания ГВ из блоков с реками	27	0,00	0,0000
Суммарная величина разгрузки ГВ в реки	944 913	44,13	1,4009
Суммарная величина разгрузки ГВ эвапотранспирацией	1 033 423	48,26	1,5321
Нисходящий переток ГВ в палеоген-среднечетвертичный ВК	304 800	14,23	0,4519
Нисходящий переток межпластовых вод из палеоген-среднечетвертичного ВК в оксфорд-сеноманский ВК	62 353	2,91	0,0924
Нисходящий переток межпластовых вод из оксфорд-сеноманского ВК в верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК	335	0,02	0,0005

Суммарная величина инфильтрационного питания грунтовых вод при заданных параметрах и граничных условиях составила 1 978 315 м<sup>3</sup>/сут (высота слоя воды 92,39 мм/год, или 2,93 л/сек·км<sup>2</sup>). Получена также требуемая величина подземного стока в реки, равная 944 913 м<sup>3</sup>/сут (высота слоя воды 44,13 мм/год, или 1,40 л/сек·км<sup>2</sup> – в расчете на всю площадь моделируемых водосборов). В табл. 2 данные по восходящему потоку подземных вод не приведены, так как водосборы рек Лесная и Мухавец представлены в ЧГФМ «LiM» как балансово-замкнутые гидродинамические элементы гидролитосферы, полностью изолированные от соседних водосборов непроницаемыми в гидродинамическом отношении границами. Величина дисбаланса в расчете перетоков воды между соседними ВК не превышает 5,7 м<sup>3</sup>/сут, что составляет менее 0,01 % от суммарного водообмена между палеоген-среднечетвертичным и оксфорд-сеноманским ВК. Между другими ВК дисбаланс оценки величины водообмена еще ниже.

Распределение интенсивности инфильтрационного питания ГВ по площади моделируемой территории показано на рис. 12. По 2-й и 3-й зонам, на территории которых преобладает эвапотранспирация, при оценке среднемноголетней величины разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией и в реки учтены внутригодовые изменения инфильтрационного питания.



**Рис. 12. Карта интенсивности инфильтрационного питания грунтовых вод на водосборах рек Лесная и Мухавец после согласования исходной и модельной величин подземного стока в реки (по результатам моделирования)**

**Fig. 12. Map of groundwater infiltration intensity at the catchments of the Lesnaya and Mukhavets rivers after harmonisation of initial and model values of groundwater flow into the rivers (based on modelling results)**

Среднемноголетняя величина интенсивности инфильтрационного питания ГВ изменяется по площади водосборов рек Лесная и Мухавец практически от нуля до 600 мм/год (см. рис. 12). Однако преобладают значения, не превышающие 300 мм/год: до 30 мм/год – 40 % площади водосборов; 30–100 мм/год – 32; 100–300 мм/год – 22; более 300 мм/год – 6 % площади водосборов.

Модельные уровни ГВ на 2-м этапе калибрации изменились несущественно. Они увеличились менее чем на 0,3 м по всей моделируемой территории (0,1 м и менее для 94 % расчетных блоков модели «lim-4wrd»; от 0,1 до 0,3 м – 6 %).

На наш взгляд, почти полное совпадение фактических (принятых к расчету) и модельных критериев согласования не является доказательством высокой точности вычисления результирующей величины инфильтрационного питания и суммарной величины питания ГВ с учетом внутригодовых

изменений интенсивности инфильтрации во 2-й и 3-й зонах, т. е. на территории, где эвапотранспирация значительно преобладает над инфильтрацией атмосферных осадков. Многое зависит от достоверности принятой к расчетам величины подземного стока в реки (в том числе и от карты гидроизогипс). Карта подземного стока в реки Беларуси [3] построена в 1974 г. на основе результатов расчленения речных гидрографов по 154 гидрологическим постам (одна расчетная точка на 1348 км<sup>2</sup>). В настоящее время на территории бассейнов рек Лесная и Мухавец функционирует девять гидрологических постов (одна расчетная точка на 868 км<sup>2</sup>). Величина подземного стока в реки, как и характеристики всех факторов, влияющих на режим подземных и поверхностных вод, постоянно изменяются. Поэтому привести все показатели, влияющие на величину подземного стока, к некоему единому знаменателю практически невозможно.

Для повышения надежности количественных оценок показателей инфильтрационного водообмена необходим комплексный подход на основе совместного использования балансового, гидролого-гидрогеологического методов и моделирования процессов формирования инфильтрационного питания в рамках геогидрологической воднобалансовой модели [10] с учетом накопленного опыта [4, 7–15, 18, 21, 24 и др.] по конкретным гидрогеологическим объектам.

**Заключение.** В статье изложен новый методический подход количественной оценки инфильтрационного водообмена слабодренированных речных бассейнов. Его реализация продемонстрирована на примере численной геофильтрационной модели водосборов слабодренированных рек Лесная и Мухавец, занимающих большую часть площади Брестского гидрогеологического бассейна.

ЧГФМ водосборов рек Лесная и Мухавец создана на базе лицензионного программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (вычислительная программа GWFS – разработчик А. А. Рошаль, г. Москва).

Калибрация модели заключалась в получении заданной величины подземного стока в реки и согласовании модельных и фактических напоров грунтовых вод на период летне-осенней межени путем определения интенсивности инфильтрационного питания и проводимости подрусловых отложений. Удовлетворительные результаты калибрации получены после расчленения модельного притока в блоки с реками на расход грунтовых вод в реки и инфильтрационный расход через зону аэрации.

Для оценки результирующей величины инфильтрационного питания использована методика, суть которой заключается в задании над грунтовым водоносным горизонтом фиктивной границы 3-го рода в виде слабопроницаемого слоя и водоема, в котором дублируются уровни воды грунтового водоносного горизонта. Применение данной методики позволило получить минимальную разницу в величине модельных и фактических напоров грунтовых вод (ниже уровня ошибок в исходных данных).

Дана количественная оценка многолетнего результирующего инфильтрационного питания, представляющего собой интегральный показатель современного вертикального водообмена подземных вод с окружающей средой. Его среднемноголетняя величина равна 17 мм/год. Изменение результирующей величины инфильтрационного питания по площади водосборов рек Лесная и Мухавец представлено в виде отдельной карты.

Выполнена количественная оценка составляющих баланса грунтовых, межпластовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец с учетом внутригодовых изменений инфильтрационного питания: суммарная среднемноголетняя величина инфильтрационного питания грунтовых вод – 92,4 мм/год; среднемноголетняя величина разгрузки грунтовых вод в реки – 44,1; суммарная среднемноголетняя величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией – 48,3; среднемноголетняя интенсивность водообмена между грунтовым и межпластовыми водоносными горизонтами – 14,2 мм/год.

#### Список использованных источников

1. Всеволожский, В. А. Основы гидрогеологии : учебник / В. А. Всеволожский. – М. : МГУ, 2007. – 448 с.
2. Всеволожский, В. А. Подземный сток и водный баланс платформенных структур / В. А. Всеволожский. – М. : Недра, 1983. – 167 с.
3. Белецкий, С. С. Общий подземный сток БССР / С. С. Белецкий // Комплексное использование и охрана подземных вод БССР. – Минск, 1976. – С. 20–36.
4. Гавич, И. К. Многолетняя изменчивость питания и режима подземных вод природно-техногенных систем верхнего этажа гидролитосферы : обзор АОЗТ «Геоинформмарк» / И. К. Гавич // Гидрогеол., инж. геология. – М., 1996. – Вып. 4. – 42 с.
5. Гавич, И. К. Вопросы методологии изучения региональной гидрогеодинамики / И. К. Гавич, В. М. Шестаков // Актуальные проблемы гидрогеологии : докл. сов. геол. на XXVIII сессии Междунар. геол. конгр., Вашингтон, июль 1989 г. ; Министерство геологии СССР, Национальный комитет геологов Советского Союза, ВСЕГИНГЕО. – М., 1989. – С. 26–31.

6. Гензель Г. Н. [и др.]. Решение задач охраны подземных вод на численных моделях / Г. Н. Гензель [и др.] ; под ред. В. А. Мироненко. – М. : Недра, 1992. – 240 с.
7. Гриневский, С. О. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей / С. О. Гриневский, С. П. Поздняков // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37, № 5. – С. 1–15.
8. Гриневский, С. О. Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе геогидрологических моделей : дис. докт. геол.-минер. наук / С. О. Гриневский. – М. : МГУ, 2012. – 382 с.
9. Гриневский, С. О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод / С. О. Гриневский. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 152 с.
10. Гриневский, С. О. Оценка естественных ресурсов подземных вод на основе геогидрологического моделирования инфильтрационного питания / С. О. Гриневский, Я. В. Иванова, А. О. Сафонов // Изв. высш. учеб. завед. Геология и разведка. – 2016. – № 5. – С. 45–52.
11. Жогло, В. Г. К оценке интенсивности площадного питания подземных вод / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады Академии наук Беларусь. – 1992. – Т. XXXVI, № 11–12. – С. 1005–1007.
12. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидролитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло ; Нац. акад. Наук Беларусь, Ин-т геол. наук. – Минск, 2001. – 176 с.
13. Жогло, В. Г. Естественные ресурсы подземных вод водосборов рек Лесная и Мухавец / В. Г. Жогло // Актуальные проблемы наук о земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Брест, 2021. – Ч. 2. – С. 14–18.
14. Жогло, В. Г. К проблеме оценки эксплуатационных запасов и прогноза качества пресных подземных вод трансграничных регионов (на примере Подлясско-Брестской впадины) / В. Г. Жогло // Актуальные проблемы наук о земле: исследования трансграничных регионов : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Брест, 2023. – С. 104–109.
15. Зеегофер Ю. О. [и др.]. Постоянно действующие модели гидролитосферы территорий городских агломераций (на примере Московской агломерации) / Ю. О. Зеегофер [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 198 с.
16. Зиновенко, Г. В. Подлясско-Брестская впадина: строение, история развития и полезные ископаемые / Г. В. Зиновенко, Р. Г. Гарецкий. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 142 с.
17. Козлов, М. Ф. Гидрогеология Припятского Полесья / М. Ф. Козлов. – Минск : Наука и техника, 1977. – Т. 2. – 272 с.
18. Крашин, И. И. Моделирование фильтрации и теплообмена в водонапорных системах / И. И. Крашин. – М. : Недра, 1976. – 159 с.
19. Кудельский, А. В. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич. – Минск : Беларуская навука, 2014. – 271 с.
20. Ломакин, Е. А. Численное моделирование геофильтрации / Е. А. Ломакин, В. А. Мироненко, В. М. Шестаков. – М. : Недра, 1988. – 228 с.
21. Пашковский, И. С. Подземный сток в многопластовых системах / И. С. Пашковский // Ресурсы подземных вод: современные проблемы изучения и использования : материалы Междунар. науч. конф. – М., 2010. – С. 50–54.
22. Подземный сток Центральной и Восточной Европы. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1982. – 288 с.
23. Поздняков С. П. [и др.] Ретроспективный анализ многолетних колебаний уровней воды в Докучаевском колодце в Каменной Степи / С. П. Поздняков [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. – 2023. – № 4. – С. 110–126.
24. Поздняков, С. П. Анализ многолетней динамики инфильтрационного питания подземных вод на основе теории влагопереноса: обзор АОЗТ «Геоинформмарк» / С. П. Поздняков, // Гидрогеол., инж. геология. – М., 1996. – Вып. 5. – 47 с.
25. Припятское Полесье: Карта водопроводимости первого от поверхности водоносного горизонта Припятского Полесья / сост. и подг. к изд. Институт геохимии и геофизики АН БССР ; сост.: М. Ф. Козлов [и др.]. – 1 : 500 000. – БССР, 1970.
26. Припятское Полесье: Карта гидроизогипс первого от поверхности водоносного горизонта Припятского Полесья / сост. и подг. к изд. Институт геохимии и геофизики АН БССР ; сост.: М. Ф. Козлов и А. М. Дронова. – 1 : 500 000. – БССР, 1970.
27. Припятское Полесье: Карта глубин залегания первого от поверхности водоносного горизонта Припятского Полесья / сост. и подг. к изд. Институт геохимии и геофизики АН БССР ; сост.: М. Ф. Козлов [и др.]. – 1 : 500 000. – БССР, 1970.
28. Рельеф территории Подлясско-Брестской впадины / Н. Ф. Гречаник, А. В. Матвеев, М. А. Богдасаров ; под ред. А. В. Матвеева. – Брест : БрГУ, 2013. – 154 с.
29. Фролов, Н. М. Методология понятийно-терминологических исследований в гидрогеологии / Н. М. Фролов // Новые аспекты региональных гидрогеологических исследований : сб. науч. тр. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1983. – Вып. 151. – С. 5–26.
30. Шестаков, В. М. Геогидрология – научное направление и образовательная дисциплина / В. М. Шестаков // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. – 1999. – № 4. – С. 75–80.
31. Шестаков, В. М. Гидрогеодинамика : учебник / В. М. Шестаков. – М. : КДУ, 2009. – 334 с.
32. Шестопалов, В. М. О роли аномальных зон геологической среды в вертикальных водообменно-миграционных процессах / В. М. Шестопалов, А. С. Богуславский, В. Н. Бублясь // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2004. – № 1. – С. 46–59.

### References

1. Vsevolozhsky V. A. *Osnovy gidrogeologii* [Basics of hydrogeology]. Moscow, MSU Publ., 2007, 448 p. (in Russian)
2. Vsevolozhsky V. A. *Podzemnyj stok i vodnyj balans platformennyh struktur* [Underground flow and water balance of platform structures]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 167 p. (in Russian)
3. Beletsky S. S. *Total underground flow of the BSSR* [Complex use and protection of underground waters of the BSSR]. Minsk, 1976, p. 20–36. (in Russian)
4. Gavich I. K. *Mnogoletnaya izmenchivost' pitaniya i rezhima podzemnyh vod prirodno-tehnogennyh sistem verhnego etazha gidrolitosfery* [Long-term variability of the nutrition and regime of groundwater in natural-technogenic systems of the upper floor of the hydrolithosphere]. *Obzor AOZT "Geoinformmark"* [Review of AOZT 'Geoinformmark']. *Hydrogeol., eng. geology*. Moscow, 1996, iss. 4, 42 p. (in Russian)
5. Gavich I. K., Shestakov V. M. *Voprosy metodologii izuchenija regionalnoj hidrogeodinamiki* [Issues of methodology for studying regional hydrogeodynamics]. *Aktual'nye problemy hidrogeologii. Doklady sov. geol. na XXVIII sessii Mezhdunar. geologicheskogo kongressa* [Proc. XXVIII session of Int. geology congr. "Current problems of hydrogeology"]. Moscow, 1989, pp. 26–31. (in Russian)
6. Genzel G. N., Karachevtsev N. F., Konosavsky P. K., Kravchuk S. V., Mironenko V. A., Ruminin V. G. *Reshenie zadach ohrany podzemnyh vod na chislennyyh modelyah* [Solving problems of groundwater protection using numerical models]. Ed. V. A. Mironenko. Minsk, Nedra Publ., 1992, 240 p. (in Russian)
7. Grinevsky S. O. *Hidrogeodinamicheskoe modelirovanie vzaimodejstviya podzemnyh i poverhnostnyh vod* [Hydrogeodynamic modeling of the interaction of groundwater and surface water]. Minsk, 2014, 152 p. (in Russian)
8. Grinevsky S. O., Ivanova Y. V., Safonov A. O. *Ocenka estestvernyh resursov podzemnyh vod na osnove geohydrologicheskogo modelirovaniya infiltracionnogo pitaniya* [Assessment of natural groundwater resources based on geo-hydrological modeling of infiltration recharge]. *News of higher education institution. Geologiya i razvedka*, 2016, no. 5, pp. 45–52. (in Russian)
9. Grinevsky S. O. *Ocenka infiltracionnogo pitaniya i resursov podzemnyh vod na osnove geohydrologicheskikh modelej*. Diss. dokt. geol-miner. nauk [Assessment of infiltration recharge and groundwater resources based on geohydrological models. Dr. geol. and miner. sci. diss.]. Moscow, MSU, 2012, 382 p. (in Russian)
10. Grinevsky S. O., Pozdnyakov S. P. *Principy regionalnoj ocenki infiltracionnogo pitaniya podzemnyh vod na osnove geohydrologicheskikh modelej* [Principles for regional assessment of groundwater infiltration recharge based on geo-hydrological models]. *Vodnye resursy*, 2010, vol. 37, no. 5, pp. 1–15. (in Russian)
11. Zhoglo V. G. *Estestvennye resursy podzemnyh vod vodosborov rek Lesnaya i Mukhavets* [Natural groundwater resources of the Lesnaya and Mukhavets river catchments]. *Aktual'nye problemy nauk o zemle: ispol'zovanie prirodnyh resursov i sohranenie okruzhayushchej sredy. Materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. V Int. sci. and pract. conf. 'Current problems in geosciences: use of natural resources and conservation of the environment']. Brest, 2021, part 2, pp. 14–18. (in Russian)
12. Zhoglo V. G. *K probleme ocenki ekspluatacionnyh zapasov i prognoza kachestva presnyh podzemnyh vod transgranicnyh regionov (na primere Podlyassko-Brestskoj vpadiny)* [To the issue of assessing operational reserves and forecasting the quality of freshwater groundwater in transboundary regions (using the example of the Podlasie-Brest depression)]. *Aktual'nye problemy nauk o zemle: issledovaniya transgranichnyh regionov. Materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. V Int. sci. and pract. conf. 'Current problems in geosciences: cross-border regional studies']. Brest, 2023, pp. 104–109. (in Russian)
13. Zhoglo V. G., Pletnev A. A. *K ocenke intensivnosti ploshadnogo pitaniya podzemnyh vod* [Towards assessing the intensity of areal groundwater recharge]. *Reports of the Academy of Sciences of Belarus*, 1992, vol. XXXVI, no. 11–12, pp. 1005–1007. (in Russian)
14. Zhoglo V. G. *Sistema chislennyh geofiltracionnyh modelej verhnego etazha hidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus*. Monograph [System of numerical geofiltration models of the upper floor of the hydrolithosphere of the south-east of the Republic of Belarus. Monograph]. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Geology, Minsk, 2001, 176 p. (in Russian)
15. Zegofer Y. O., Klyukvin A. N., Pashkovsky I. S., Roshal A. A. *Postoyanno dejstvuyushie modeli hidrolitosfery territorij gorodskih aglomeracij (na primere Moskovskoj aglomeracii)* [Permanent models of the hydrolithosphere of urban agglomeration territories (using the example of the Moscow agglomeration)]. Minsk, Navuka Publ., 1990, 198 p. (in Russian)
16. Zinovenko G. V., Garetsky R. G. *Podlyassko-Brestskaya vpadina: stroenie, istoriya razvitiya i poleznye iskopaemye* [Podlasie-Brest Depression: structure, development history, and Mineral Resources]. Minsk, Belarusian Sci. Publ., 2009, 142 p. (in Russian)
17. Kozlov M. F. *Gidrogeologiya Pripyatskogo Polesya* [Hydrogeology of Pripyat Polesie]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1977, vol. 2, 272 p. (in Russian)
18. Krashin I. I. *Modelirovanie filtracii i teploobmena v vodonapornyh sistemah* [Modeling of filtration and heat transfer in water-pressure systems]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 159 p. (in Russian)
19. Kudelskij A. V., Pashkevich V. I. *Regionalnaya hidrogeologiya i geochemiya podzemnyh vod* [Regional hydrogeology and geochemistry of groundwater]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2014, 271 p. (in Russian)
20. Lomakin E. A., Mironenko V. A., Shestakov V. M. *Chislennoe modelirovanie geofiltracii* [Numerical modeling of geofiltration]. Minsk, Nedra Publ., 1988, 228 p. (in Russian)
21. Pashkovsky I. S. *Podzemnyj stok v mnogoplastovyh sistemah* [Underground flow in multilayer systems]. *Resursy podzemnyh vod: sovremennoye problemy izuchenija i ispol'zovaniya. Materialy Mezhdunar. nauch. konf.* [Proc. Int. sci. conf. "Groundwater resources: modern problems of study and use"]. Moscow, 2010, pp. 50–54. (in Russian)

22. *Podzemnyj stok Centralnoj i Vostochnoj Evropy* [Groundwater flow in Central and Eastern Europe]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1982, 288 p. (in Russian)
23. Pozdnyakov S. P., Vedyashkina V. V., Filimonova E. A., Pozdnyakova N. I. *Retrospektivnyj analiz mnogoletnih kolebanij urovnej vody v Dokuchaevskom kolodce v Kamennoj Stepi* [Retrospective analysis of long-term fluctuations in water levels in the Dokuchaevsky well in the Kamennaya Steppe]. *Vestnik Mosk. universiteta. Seria 4, Geologiya*, 2023, no. 4, pp. 110–126. (in Russian)
24. Pozdnyakov S. P., Shestakov V. M. *Analiz mnogoletnej dinamiki infiltracionnogo pitaniya podzemnyh vod na osnove teorii vlagoperenosa* [Analysis of long-term dynamics of infiltration recharge of groundwater based on the theory of moisture transfer]. *Review of AOZT "Geoinformmark", Hydrogeol., eng. geology*. Moscow, 1996, iss. 5, 47 p. (in Russian)
25. *Pripyatskoe Polese: Karta vodoprovodimosti pervogo ot poverhnosti vodonosnogo gorizonta Pripyatskogo Polesya* [Pripyat Polesie: Map of water conductivity of the first aquifer from the surface of Pripyat Polesie]. Comp. and preparation for publ. Institute of Geochemistry and Geophysics of the Academy of Sciences of the BSSR. Comp. by M. F. Kozlov, e. a. 1 : 500 000. BSSR, 1970. (in Russian)
26. *Pripyatskoe Polese: Karta gidroizogips pervogo ot poverhnosti vodonosnogo gorizonta Pripyatskogo Polesya* [Pripyat Polesie: Map of hydroisohypses of the first aquifer from the surface of Pripyat Polesie]. Comp. and preparation for publ. Institute of Geochemistry and Geophysics of the Academy of Sciences of the BSSR. Comp. by M. F. Kozlov, A. M. Dronova. Scale 1 : 500 000. BSSR, 1970. (in Russian)
27. *Pripyatskoe Polese: Karta glubin zaleganiya pervogo ot poverhnosti vodonosnogo gorizonta Pripyatskogo Polesya* [Pripyat Polesie: Map of the depths of the first aquifer from the surface of Pripyat Polesie]. Comp. and preparation for publ. Institute of Geochemistry and Geophysics of the Academy of Sciences of the BSSR. Comp. by M. F. Kozlov, e. a. Scale 1 : 500 000. BSSR, 1970. (in Russian)
28. Grechanik N. F., Matveev A. V., Bogdasarov M. A. *Relief territorii Podlyassko-Brestskoj vpadiny* [Relief of the territory of the Podlasko-Brest depression]. Ed. A. V. Matveeva. Brest, BrGU Publ., 2013, 154 p. (in Russian)
29. Frolov N. M. *Metodologiya ponyatijno-terminologicheskikh issledovanij v hidrogeologii* [Proc. "Methodology of conceptual and terminological research in hydrogeology"]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1983, iss. 151, pp. 5–26. (in Russian)
30. Shestakov V. M. *Geogidrologiya – nauchnoe napravlenie i obrazovatel'naya disciplina* [Geohydrology is a scientific direction and educational discipline]. *Hazard of Moscow University. Pt. 4, Geologiya*, 1999, no. 4, pp. 75–80. (in Russian)
31. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009, 334 p. (in Russian)
32. Shestopalov V. M., Boguslavsky A. S., Bublys V. N. *O roli anomalnyh zon geologicheskoy sredy v vertikalnyh vodoobmenno-migracionnyh processah* [On the role of anomalous zones of the geological environment in vertical water exchange and migration processes]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2004, no. 1, pp. 46–59. (in Russian)

#### Информация об авторе

Жогло Василий Гаврилович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией гидрогеологии и гидроэкологии, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

#### Information about the author

Vasily G. Zhoglo – Dr. Sc. (Geological and Mineralogical), Docent, Head of the Laboratory of Hydrogeology and Hydroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-123-130>

УДК 622.271.6

Поступила в редакцию 25.10.2024

Received 25.10.2024

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КАРБОНАТНОГО САПРОПЕЛЯ  
ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ**

**В. Б. Кунцевич, Б. В. Курзо, О. М. Гайдукевич, Т. И. Макаренко,  
И. В. Агейчик, А. Ю. Татков, Л. П. Калилец**

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Приведена методика расчета основных характеристик сапропеля, залегающего под торфом, на опытном участке торфяного месторождения Гала-Ковалевское. Показано, что в случае извлечения карбонатного сапропеля на участке по технологии скважинной гидродобычи, к потерям балансовых запасов относится площадь, занятая осушительной сетью. Коэффициент использования балансовых запасов составил 0,93. При влажности сапропелевой пульпы 97 % теоретический выход воздушно-сухого вещества с условной влажностью 60 % из 1 м<sup>3</sup> равен 0,075 т/м<sup>3</sup>. Рассмотрены два способа определения коэффициента добавления воды: по массе разработанной сапропелевой залежи и ее влажности, и по содержанию сухого вещества в залежи и пульпе. Полевыми опытами установлено, что при добыче карбонатного сапропеля скважинным способом среднее содержание сухого вещества в пульпе составляет 3 %.

Применительно к сапропелю влажностью 73,4 %, залегающему под слоем торфа на опытном участке, коэффициент добавления воды составил 7,9 на 1 т сапропеля при влажности пульпы 97 %. Приведен график добавления необходимого количества воды в зависимости от влажности сапропеля в залежи и влажности пульпы. Показано, что существует оптимальная влажность пульпы, обеспечивающая при заданных условиях максимальную программу добычи сапропеля и рациональную зону реологических параметров, в пределах которой гидротранспорт сапропелевой пульпы целесообразен.

**Ключевые слова:** торфяное месторождение; сапропель; опытный участок; технология скважинной гидродобычи; основные характеристики.

**Для цитирования.** Кунцевич В. Б., Курзо Б. В., Гайдукевич О. М., Макаренко Т. И., Агейчик И. В., Татков А. Ю., Калилец Л. П. Методика расчета физико-технических и эксплуатационных характеристик карбонатного сапропеля при применении скважинной гидродобычи // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 123–130.

**METHOD OF THE CALCULATING OF THE PHYSICAL, TECHNICAL AND OPERATIONAL  
CHARACTERISTICS OF CARBONATE SAPROPEL  
IN BOREHOLE HYDRAULIC MINING USE**

**V. B. Kuntsevich, B. V. Kurzo, O. M. Gaidukovich, T. I. Makarenko,  
I. V. Ageichik, A. Yu. Tatkov, L. P. Kalilets**

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

**Abstract.** The article presents a method for calculating the main characteristics of sapropel lying under peat in experimental area of Gala-Kovalevskoye peat deposit. It has been shown that in the case of extracting carbonate sapropel in the area using borehole hydraulic mining technology, the area occupied by the drainage network is considered to be a loss of balance reserves. The coefficient of balance reserves use was 0.93. With sapropel pulp moisture content of 97 %, the theoretical yield of air-dry matter, with conditional moisture content of 60 %, from 1 m<sup>3</sup> is 0.075 t/m<sup>3</sup>. Two methods for the determining of the water addition coefficient are considered: by the mass of the developed sapropel deposit and its moisture content, and by dry matter content in the deposit and pulp. Field experiments have shown that when extracting

carbonate sapropel using a borehole method, an average dry matter content in the pulp is 3%. In regard to sapropel with the moisture content of 73.4 %, lying under the layer of peat in the experimental area, water addition coefficient was 7.9 per 1 t of sapropel with pulp moisture content of 97 %. The graph of the required amount of water addition has been given depending on the sapropel moisture content in the deposit and the pulp moisture content. It has been shown that there is an optimal pulp moisture content that ensures, under the given conditions, the maximum sapropel extraction program and the rational zone of rheological parameters within which the hydrotransport of sapropel pulp is advisable.

**Keywords:** peatland; sapropel; pilot site; borehole hydraulic mining technology; main characteristics.

**For citation.** Kuntsevich V. B., Kurzo B. V., Gaidukovich O. M., Makarenko T. I., Ageichik I. V., Tatkov A. Yu., Kalilets L. P. Method of the calculating of the physical, technical and operational characteristics of carbonate sapropel in borehole hydraulic mining use. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 123–130.

**Введение.** Технологический процесс скважинной гидродобычи сапропеля осуществляется с помощью размыва отдельных генетических слоев сапропеля тонкими струями воды высокого давления с одновременным засасыванием сапропелевой пульпы и транспортированием ее по трубопроводам к месту сушки. К основным физико-техническим и эксплуатационным характеристикам сапропеля и сапропелевой гидросмеси (пульпы) относятся балансовые, забалансовые и промышленные запасы сапропеля, выход сухого вещества из 1 м<sup>3</sup> сапропелевой гидросмеси, коэффициент добавления воды, годовая программа добычи сапропеля.

Учитывая, что в настоящее время практического опыта применения технологии скважинной гидродобычи сапропеля, залегающего под торфом, в промышленных масштабах не имеется, терминология и определение отдельных его показателей приняты по аналогии с торфом.

Детальная разведка торфяного месторождения Гала-Ковалевское (кадастровый номер 870) выполнена институтом «Белторфпроект» в 1953–1954 гг. В результате определены запасы торфа в границах промышленной глубины и мощность сапропеля в каждой точке зондирования.

Для проведения исследований по определению вышеуказанных характеристик на месторождении выбран опытный участок площадью брутто 15 га, на которой до 2021 г. осуществлялась добыча фрезерного торфа.

**Методы исследований** включают анализ опубликованных материалов по влиянию скважинной гидродобычи полезных ископаемых на их физико-технические и механические свойства, полевые работы по выбору опытного участка, отбор проб для определения качественных характеристик торфа и сапропеля, лабораторные и полевые исследования, теоретические расчеты.

**Результаты.** Запасы сапропеля по народнохозяйственному значению разделяются на балансовые и забалансовые. Балансовые – запасы сапропеля, удовлетворяющие установленным кондициям, и запасы, использование которых в настоящее время экономически целесообразно. Забалансовые – запасы сапропеля, которые не удовлетворяют перечисленным выше требованиям.

**Расчет балансовых и промышленных запасов.** Граница залегания балансовых запасов сапропеля проводится по точкам с глубиной залежи сапропеля 0,5 м. При современных методах разработки залежь сапропеля не используется полностью из-за потерь, которые остаются под торфом. К потерям сапропеля, добываемого по технологии скважинной гидродобычи, относится залежь, расположенная в зонах вокруг озер и водохранилищ шириной полос 200–250 м, под зданиями и сооружениями, а также на трассах осушительных каналов [1]. Реальные потери балансовых запасов определяются в каждом конкретном случае по результатам детальной разведки на стадии разработки проекта на добычу сапропеля. Ориентируясь на данные института «Белторфпроект» в потери площади с сапропелем на опытном участке отнесена площадь, занятая осушительной сетью:

$$F_n = (B_v L) + [(B_k l) n], \quad (1)$$

где  $F_n$  – площадь, занятая осушительной сетью, м<sup>2</sup>;  $B_v$  – ширина валового канала по верху, м;  $L$  – длина валового канала в пределах опытного участка, м;  $B_k$  – ширина картового канала по верху, м;  $l$  – длина картового канала, м;  $n$  – количество картовых каналов на опытном участке (ширина карты 20 м), шт.

$$F_n = (3 \cdot 300) + [(1,2 \cdot 500) \cdot 16] = 10\ 500 \text{ м}^2 = 1,05 \text{ га}.$$

По качественной характеристике все запасы сапропеля относятся к балансовым ( $w = 73,4\%$ ;  $A^c = 51,1\%$ , глубина залегания во всех точках зондирования превышает 0,5 м) и равны

$$P_6 = 10^4 F_{bp} h_{cp}, \quad (2)$$

где  $P_6$  – балансовые запасы сапропеля, тыс. м<sup>3</sup>;  $F_{bp}$  – площадь брутто, га;  $h_{cp}$  – средняя глубина залегания сапропеля, м;

$$P_6 = 10^4 \cdot 15,00 \cdot 1,3 = 195,0 \text{ тыс. м}^3.$$

Потери запасов сапропеля

$$P_{\text{п}} = 10^4 F_{\text{п}} h_{\text{cp}} = 10^4 \cdot 1,05 \cdot 1,3 = 13,7 \text{ тыс. м}^3. \quad (3)$$

*Промышленные запасы* – вырабатываемая часть балансовых запасов, превращаемых в продукцию. На опытном участке они составляют:

$$P_{\text{пп}} = P_6 - P_{\text{п}} = 195,0 - 13,7 = 181,3 \text{ тыс. м}^3. \quad (4)$$

Коэффициент использования балансовых запасов

$$K_6 = \frac{P_{\text{пп}}}{P_6} = \frac{181,3}{195,0} = 0,93. \quad (5)$$

Пересчет промышленных запасов из объема в тонны воздушно-сухого сапропеля осуществляется по формуле

$$G = P_{\text{пп}} \rho_3 \frac{100 - w_1}{100 - w_{\text{усл}}}, \quad (6)$$

где  $G$  – промышленные запасы сапропеля в пересчете на условную влажность, тыс. т;  $\rho_3$  – плотность сапропеля в залежи [2], т/м<sup>3</sup>;  $w_1$  – влажность сапропеля в залежи, %;  $w_{\text{усл}}$  – условная влажность, равная 60 %.

$$G = 181,3 \cdot 1,09 \cdot \frac{100 - 73,4}{100 - 60} = 131,4 \text{ тыс. т.}$$

**Расчет выхода воздушно-сухого вещества из 1 м<sup>3</sup> сапропелевой залежи и сапропелевой гидросмеси.** Выходом называется массовое количество воздушно-сухого сапропеля с условной влажностью 60 %, получаемое из 1 м<sup>3</sup> сапропелевой залежи или гидросмеси.

Расчет выполнен аналогично расчету выхода воздушно-сухого торфа из торфяной залежи и торфяной пульпы [3].

Масса абсолютно сухого вещества в 1 м<sup>3</sup> сапропелевой залежи

$$M_3 = 1 \rho_3 \frac{C_c}{100}, \quad (7)$$

где  $C_c$  – содержание сухого вещества в сапропеле, %.

Масса абсолютно сухого вещества при теоретическом выходе

$$M_t = P_t \frac{C_{\text{усл}}}{100}, \quad (8)$$

где  $P_t$  – теоретический выход из 1 м<sup>3</sup> воздушно-сухого сапропеля, т;  $C_{\text{усл}}$  – условное содержание сухого вещества воздушно-сухого сапропеля, равное 40 %.

Правые части выражений (7) и (8) равны между собой:

$$1 \rho_3 \frac{C_c}{100} = P_t \frac{C_{\text{усл}}}{100}.$$

Откуда для сапропелевой залежи теоретический выход составляет:

$$P_t = \frac{\rho_3 \cdot 1 C_c}{C_{\text{усл}}}, \quad (9)$$

где  $\rho_3$  – плотность сапропелевой залежи.

Для сапропелевой пульпы

$$P_t = \frac{\rho_c \cdot 1 C_n}{C_{\text{усл}}}, \quad (10)$$

где  $\rho_c$  – плотность сапропелевой пульпы [4];  $C_n$  – содержание сухого вещества в сапропелевой пульпе, %.

Принимая  $\rho_c = 1 \text{ т}/\text{м}^3$ , без значительной погрешности для расчетов, теоретический выход из сапропелевой пульпы

$$P_t = \frac{1C_n}{C_{\text{усл}}} = \frac{1C_n}{40}. \quad (11)$$

При влажности сапропелевой гидросмеси 97 % теоретический выход составит:

$$P_t = \frac{1 \cdot 3}{40} = 0,075 \text{ т.}$$

Теоретический выход воздушно-сухого сапропеля из залежи

$$P_t = \frac{\rho_3 C_c}{40}. \quad (12)$$

При влажности сапропеля в залежи 73,4 % теоретический выход составит:

$$P_t = \frac{1,09 \cdot 26,6}{40} = 0,72 \text{ т.}$$

Практический выход воздушно-сухого вещества из гидросмеси определяется с учетом коэффициента, учитывающего потери сапропеля при сушке и уборке.

**Расчет коэффициента добавления воды.** Коэффициентом добавления воды принято называть отношение массы воды к массе разработанной сапропелевой залежи [3]. Из опубликованных материалов известно, что минимальное значение влажности, при которой возможен трубопроводный транспорт сапропеля, составляет 90 % [5]. В связи с тем, что в большинстве случаев влажность сапропеля, залегающего под торфом, меньше указанного значения, при скважинной гидродобыче необходимо в залежь сапропеля добавлять воду для получения расчетной консистенции пульпы. Учитывая, что масса сухого вещества при сушке или увлажнении сапропеля не изменяется, преобразовав известную формулу [6], получена зависимость коэффициента добавления воды от влажности сапропеля в залежи и влажности пульпы:

$$d = \frac{m_1(100 - w_1)}{100 - w_2} - m_1, \quad (13)$$

где  $d$  – коэффициент добавления воды;  $m_1$  – разрабатываемая масса сапропеля в залежи, т;  $w_1$  – влажность сапропеля, %;  $w_2$  – влажность сапропелевой пульпы, %.

На рис. 1 показана графическая интерпретация полученной зависимости.

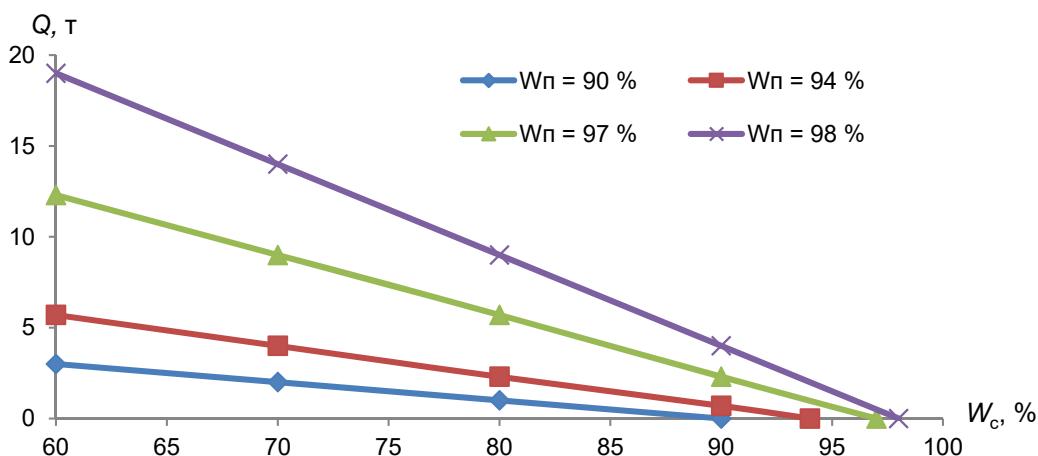


Рис. 1. Зависимость количества добавленной воды на 1 т сапропеля от его влажности ( $W_c$ ) и влажности пульпы ( $W_n$ )

Fig. 1. Dependence of the amount of water added per 1 ton of sapropel on its moisture content ( $W_c$ ) and pulp moisture content ( $W_n$ )

Как видно из рис. 1, при увеличении влажности до 97–98 % количество добавленной воды резко возрастает. Так, при влажности сапропеля в залежи 73,4 % повышение влажности пульпы на 7 % (с 90 до 97 %) приводит к увеличению коэффициента добавления воды в 4,7 раза, или в абсолютных величинах – с 1,66 до 7,86 т на 1 т сапропеля.

В литературе приведен также способ определения коэффициента добавления воды в зависимости от содержания сухого вещества в залежи и пульпе [3]:

$$d = \frac{C_c - C_n}{C_n} \quad (14)$$

Применительно к сапропелевой залежи торфяного месторождения Гала-Ковалевское, коэффициент добавления воды на 1 т сапропеля, чтобы повысить его естественную влажность до 97 %:

– по первому способу:

$$d = \frac{1 \cdot (100 - 73,4)}{100 - 97} - 1 = 7,9;$$

– по второму способу:

$$d = \frac{26,6 - 3,0}{3,0} = 7,9.$$

#### *Годовая программа добычи сапропеля*

$$\Pi = T t Q_{cm} \rho_c \frac{100 - w_2}{100 - w_{ysl}}, \quad (15)$$

где  $\Pi$  – годовая программа добычи сапропеля, тыс. т;  $T$  – количество рабочих дней в году для добычи сапропеля, дни;  $t$  – продолжительность смены, ч;  $Q_{cm}$  – расход пульпы в трубопроводе, м<sup>3</sup>/ч.

В 2023 г. авторами выполнен расчет возможной программы добычи сапропеля в зависимости от влажности пульпы [4]. Полученные результаты отображены на рис. 2.

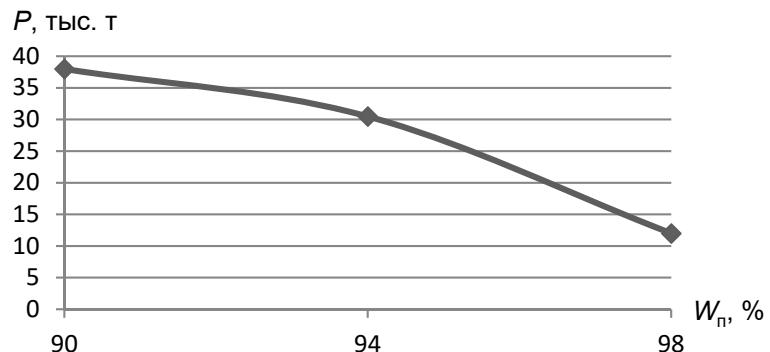


Рис. 2. Зависимость годовой программы добычи сапропеля от влажности пульпы

Fig. 2. Dependence of the annual sapropel extraction program on the moisture content of the pulp

Анализируя график, естественно предположить, что чем больше в пульпе сухого вещества, тем лучше основной показатель добычи сапропеля – годовая программа. Однако существует рациональная зона реологических параметров гидросмесей, в пределах которой из условия энергозатрат гидротранспорт легких полезных ископаемых целесообразен. Если начальное динамическое напряжение сдвига больше 30 н/м<sup>2</sup>, гидротранспорт центробежными насосами становится невыгодным, так как с незначительным увеличением консистенции пульпы резко возрастает динамическое напряжение сдвига, что приводит к значительному увеличению энергозатрат [7]. Так, по данным Г. Г. Волкова, даже в границах рациональной зоны увеличение содержания сухого вещества в пульпе с 5,3 до 11,8 % на порядок повышает начальное динамическое напряжение сдвига [8].

В опубликованных источниках мнение авторов существенно различается в оценке допустимого значения относительной влажности пульпы и, соответственно, содержания в ней сухого вещества. В большинстве своем авторы считают, что оптимальная влажность должна быть в пределах 94–97 % [9, 10]. В то же время В. И. Косов и А. П. Золотухин допускают возможность гидротранспорта торфяной и сапропелевой пульпы при влажности 90 % [5].

В текущем году сотрудниками лаборатории использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений на опытном участке торфяного месторождения Гала-Ковалевское проведены полевые исследования по установлению возможности и целесообразности применения технологии скважинной гидродобычи сапропеля, залегающего под слоем торфа. Предварительно были определены количественные и качественные характеристики торфяной залежи и погребенного под ней сапропеля, в том числе остаточная глубина торфа, мощность, тип, влажность и зольность сапропеля. Установлено, что сапропель относится к карбонатному типу, средние значения влажности и зольности составляют 73,4 и 51,1 % соответственно, средняя мощность – 1,3 м. В качестве оборудования были применены серийно выпускаемые высоконапорная и грязевая мотопомпы; набор нагнетательных, всасывающих и транспортирующих шлангов; ручной мотобур (рис. 3). Полевые исследования проведены в соответствии с разработанной методикой.



**Рис. 3. Испытания скважинного способа добычи сапропеля на торфяном месторождении Гала-Ковалевское Пуховичского района Минской области**

**Fig. 3. Testing of the borehole method of sapropel extraction at the Gala-Kovalevskoye peat deposit in the Pukhovichi district of the Minsk region**

По чертежам сотрудников лаборатории филиалом «Экспериментальная база «Свислочь» изготовлено грунтозаборное устройство, состоящее из устройств для размыва сапропеля и забора полученной пульпы. Приоритетными вопросами, которые исследовали в текущем году, являлись скорости течения воды и пульпы, производительность установки, размер зоны размыва сапропелевой залежи, содержание в пульпе сухого вещества.

В настоящее время результаты исследований обрабатываются.

**Заключение.** Выполнен расчет физико-технических и эксплуатационных характеристик сапропеля, извлеченного из-под торфа по технологии скважинной гидродобычи, в том числе балансовых, забалансовых и промышленных запасов, выхода воздушно-сухого вещества из 1 м<sup>3</sup> сапропелевой залежи и пульпы, коэффициента добавления воды, годовой программы добычи сапропеля. На торфяном месторождении Гало-Ковалевское оборудован опытный участок и проведены экспериментальные работы по оценке возможности и целесообразности скважинной гидродобычи сапропеля из-под торфа. Исследования выполнены с использованием серийно выпускавшегося оборудования и изделий: высоконапорной и грязевой мотопомп, комплекта нагнетательных, всасывающих и транспортирующих шлангов, ручного мотобура, а также специального грунтозаборного устройства, изготовленного по разработанной конструкторской документации. В результате полевых исследований определены скорости течения воды и сапропелевой пульпы в нагнетательном и транспортирующем шлангах, расход воды и пульпы, размер зоны размыва сапропелевой залежи, содержание сухого вещества в пульпе.

Экспериментальные работы показали возможность применения технологии скважинной гидродобычи сапропеля из-под торфа. Опытная установка, используемая авторами при проведении полевых исследований, способна размывать сапропель, извлекать сапропелевую пульпу на поверхность торфяной залежи и транспортировать ее к месту аккумулирования для сушки.

### Список использованных источников

1. Лазарев, А. В. Технология производства торфа / А. В. Лазарев. – М. : Недра, 1974. – 320 с.
2. Инструкция по разведке торфяных месторождений СССР : утв. М-вом геологии СССР 21.01.1983. – М. : Торфгеология, 1983. – 193 с.
3. Штин, С. М. Гидромеханизированная добыча торфа и производство торфяной продукции энергетического назначения / С. М. Штин ; под ред. И. М. Ялтанца. – М. : Горная книга, 2012. – 360 с.
4. Формулирование теоретических основ расчета гидродобычи залегающего под торфом сапропеля и разработка технологической классификации его залежей : отчет о НИР (промежут.) / нац. Акад. Наук Беларуси, Ин-т природопользования ; рук. Б. В. Курзо. – Минск, 2023. – 84 с. – № ГР 20210174.
5. Косов, В. И. От геоэкологии до нанотехнологий. Композитные строительные и топливно-энергетические материалы из органогенных горных пород и отходов / В. И. Косов, А. П. Золотухин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.
6. Физико-химические основы технологии торфяного производства / И. И. Лиштван [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1983. – 232 с.
7. Методические указания по расчету гидравлического транспорта сапропелей. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Главнечерноземводстрой. ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова. (Утв. НТС Главнечерноземводстроя при Минводхозе СССР, протокол № 216 от 20.11.1980). – М., 1981. – 53 с.
8. Волков, Г. Г. Динамическое предельное напряжение при различном содержании сухого вещества : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Г. Волков. – Минск, 1980. – 23 с.
9. Богатов, Б. А. Технология и комплексная механизация торфяного производства / Б. А. Богатов, В. А. Никифоров. – Минск : Университетское, 1988. – 463 с.
10. Лопотко, М. З. Рекомендации по технологии промышленной добычи сапропелей из открытых водоемов для удобрений / М. З. Лопотко, А. П. Лецко, С. К. Дубинин. – Минск : Наука и техника, 1981. – 78 с.

### References

1. Lazarev A. V. *Tehnologija proizvodstva torfa* [Peat production technology]. Moscow, Nedra Publ., 1974, 320 p. (in Russian)
2. *Instrukciya po razvedke torfyanyh mestorozhdenij SSSR: utv. M-vom geologii SSSR 21.01.1983* [Instructions for exploration of peat deposits in the USSR: approved by the USSR Ministry of Geology on 21 January 1983]. Moscow, Torfgeologiya Publ., 1983, 193 p. (in Russian)
3. Shtin S. M. *Gidromekhanizirovannaya dobycha torfa i proizvodstvo torfyanoj produkciyi energeticheskogo naznacheniya* [Hydromechanized extraction of peat and production of peat products for energy purposes]. Moscow, Mountain book Publ., 2012, 360 p. (in Russian)
4. *Formulirovanie teoretycheskih osnov rascheta gidrodobychi zalegayushchego pod torfom sapropelya i razrabotka tekhnologicheskoy klassifikacii ego zalezhej* [Formulation of theoretical foundations for calculating hydraulic mining of sapropel underlying peat and development of a technological classification of its deposits]. *Otchet o NIR (promezhutochnyyj)* [Research report (intermediate)]. Institute of Nature Management of the NAS of Belarus, supervisor B. V. Kurzo. Minsk, 2023, 84 p., St. Reg. no. 20210174. (in Russian)
5. Kosov V. I., Zolotuhin A. P. *Ot geoekologii do nanotekhnologij. Kompozitnye stroitel'nye i toplivno-energeticheskie materialy iz organogennyh gornyh porod i othodov* [From geoecology to nanotechnology. Composite building and fuel-energy materials from organogenic rocks and waste]. St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2010, 368 p. (in Russian)
6. Lishtvan I. I., Terentyev A. A., Bazin E. T., Golovach A. A. *Fiziko-himicheskie osnovy tekhnologii torfyanoogo proizvodstva* [Physicochemical principles of peat production technology]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1983, 232 p. (in Russian)
7. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu gidravlicheskogo transporta sapropelej. Ministerstvo melioracii i vodnogo hozjajstva SSSR. Glavnechernozemvodstroj. VNIIGiM im. A. N. Kostyakova (Utv. NTS Glavnechernozemvodstroya pri Minvodchoze SSSR, protokol № 216 ot 20.11.1980)* [Guidelines for calculating the hydraulic transport of sapropels. Ministry of Melioration and Water Resources of the USSR. Glavnechernozemvodstroy. A. N. Kostyakov VNIIGiM (Approved by the NTS of Glavnechernozemvodstroy under the Ministry of Water Resources of the USSR, protocol no. 216 of 11.20.1980)]. Moscow, 1981, 53 p. (in Russian)
8. Volkov G. G. *Dinamicheskoe predel'noe napryazhenie pri razlichnom soderzhanii suhogo veshchestva* [Dynamic ultimate stress at different dry matter content]. Avtoreferat dissertacii kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD. tech. sci. abs. diss.]. Minsk, 1980, 23 p. (in Russian)
9. Bogatov B. A., Nikiforov V. A. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizaciya torfyanoogo proizvodstva* [Technology and complex mechanization of peat production]. Minsk, University Publ., 1988, 463 p. (in Russian)
10. Lopotko M. Z., Lecko A. P., Dubinin S. K. *Rekomendacii po tekhnologii promyshlennoj dobychi sapropelej iz otkrytyh vodoemov dlya udobrenij* [Recommendations on the technology of industrial extraction of sapropels from open water bodies for fertilizers]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1981, 78 p. (in Russian)

### Информация об авторах

*Кунцевич Виктор Болеславович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

*Курзо Борис Валентинович* – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Макаренко Татьяна Ивановна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

*Гайдукеевич Олег Михайлович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Агейчик Инна Валерьевна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

*Татков Антон Юрьевич* – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Калилец Людмила Петровна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

### Information about authors

*Victor B. Kuntsevich* – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Boris V. Kurzo* – D. Cs. (Technical), Associate Professor, Head of Lab of peat and sapropel deposits utilization and protection, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Tatiana I. Makarenko* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

*Oleg M. Gaidukevich* – Ph. D. (Technical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*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

*Anton Yu. Tatkov* – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Lyudmila P. Kalilets* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

## УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ ВОДЫ В ГРУНТАХ, ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ПОРОВЫХ РАСТВОРАХ

А. Г. Бровка, И. В. Дедюля

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** В статье представлены модернизированная установка и методика для определения температуры начала замерзания воды в грунтах, горных породах и поровых растворах. Для обеспечения независимого от температуры в морозильной камере регулирования интенсивности охлаждения образцов рабочая камера установки модернизирована путем дополнения ее охранным нагревателем, помещенным на корпус устройства, и контрольной дифференциальной термопарой, встроенной в слой теплоизоляции устройства. Это дает возможность путем регулирования напряжения питания нагревателя снизить перепад температуры в слое изоляции и тем самым обеспечить замедление охлаждения в период вероятного начала замерзания исследуемых образцов, что позволит более точно определить температуру начала замерзания воды в грунтах, горных породах и поровых растворах.

**Ключевые слова:** температура переохлаждения воды; температура замерзания воды; фазовые переходы воды в лед; грунт; горная порода; поровый раствор.

**Для цитирования.** Бровка А. Г., Дедюля И. В. Установка и методика для определения температуры начала замерзания воды в грунтах, горных породах и поровых растворах // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 131–136.

## INSTALLATION AND METHODOLOGY FOR DETERMINING THE TEMPERATURE OF THE BEGINNING OF WATER FREEZING IN SOILS, ROCKS AND PORE SOLUTIONS

A. G. Brovka, I. V. Dedyulya

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

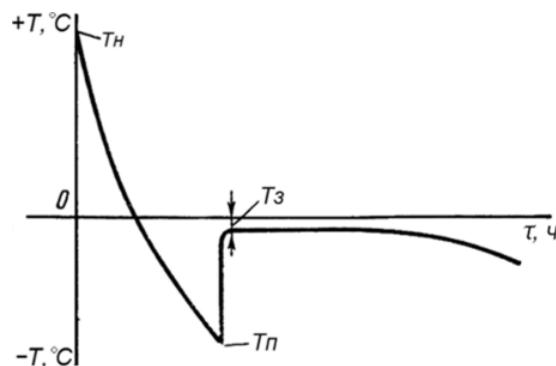
**Abstract.** The article presents a modernized installation and a methodology for the determining of the temperature of the onset of the freezing of water in soils, rocks and pore solutions. In order to provide independent from the temperature in the freezing chamber regulation of the samples cooling intensity, the working chamber of the unit is modernized by supplementing it with a security heater placed on the body of the device and a control differential thermocouple embedded in the thermal insulation layer of the device. This makes it possible by regulating the heater supply voltage to reduce the temperature difference in the insulation layer and thereby provide the slowdown of cooling during the period of the probable onset of the samples freezing under study, which will provide more accurate determination of the onset temperature of freezing. The installation can be used to express determination of the freezing onset temperature of water in soils, rocks and pore solutions.

**Keywords:** water supercooling temperature; water freezing temperature; phase transitions of water into ice; soil; rock; pore solution.

**For citation.** Brovka A. G., Dedyulya I. V. Installation and methodology for determining the temperature of the beginning of water freezing in soils, rocks and pore solutions. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 131–136.

**Введение.** Температура начала замерзания воды в дисперсных породах зависит, прежде всего, от энергии связи воды с органоминеральной фазой этих пород и степени их засоленности. Данный показатель является важным для характеристики состояния влаги в почвах, грунтах и горных породах. На практике [1–4] для экспериментального определения температуры начала замерзания воды в дисперсных породах, а также температуры замерзания растворов используют криоскопический метод, который основан на регистрации температуры в процессе охлаждения и замерзания. При постоянной

скорости отвода тепла от промерзающей системы после начала замерзания воды на кривой, отражающей зависимость температуры от времени  $T = T(\tau)$  появляется характерный изгиб, который объясняется наличием теплоты фазового перехода вода – лед (рис. 1).



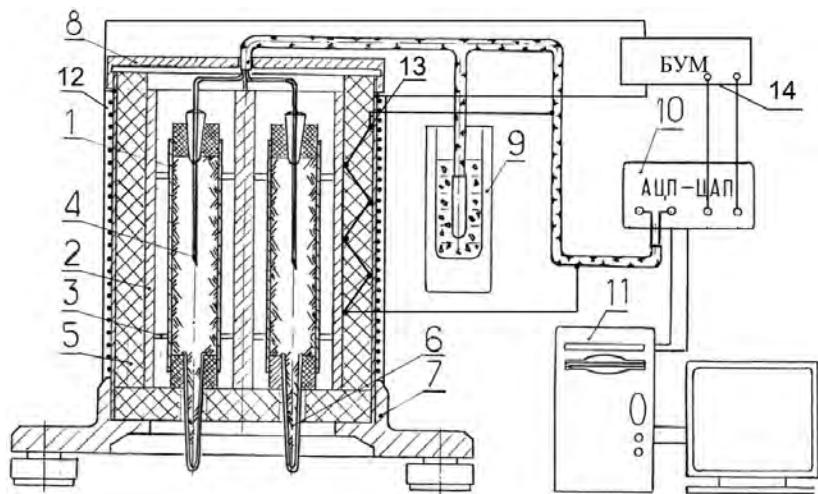
**Рис. 1. Типичная кривая переохлаждения и замерзания воды в ограниченном объеме грунта:**  
 $T_h$  – начальная температура;  $T_n$  – температура переохлаждения;  $T_3$  – температура начала замерзания

**Fig. 1. Typical curve of subcooling and freezing of water in a limited volume of soil:**  
 $T_h$  – initial temperature;  $T_n$  – subcooling temperature;  $T_3$  – freezing onset temperature

Кроме того, поскольку при промерзании любых влажных дисперсных систем вода в них значительно переохлаждается, на этой кривой фиксируется скачок температуры. Скачок этот тем больше, чем больше было переохлаждение. В идеале температура, соответствующая верхнему значению скачка, должна быть температурой начала замерзания влаги. Однако после глубокого переохлаждения, которое может быть ниже температуры начала замерзания на 4–10 °C, происходит резкое замерзание, в результате которого количество незамерзшей влаги в образце и концентрация порового раствора повышаются за счет частичного вымораживания влаги. Поэтому зарегистрированная находящимся в исследуемом грунте или растворе датчиком температура будет ниже истинной температуры начала замерзания воды или раствора. Исключить нежелательное переохлаждение и тем самым максимально приблизить измеряемое значение температуры к истинному можно путем активизации начала кристаллизации. Для этой цели можно использовать различные приемы, такие как встряхивание, постукивание по корпусу емкости с образцом, внесение затравок близких к структуре льда и т. п. Известно, что при образовании первых кристаллов льда начало фазового перехода воды в лед распространяется на весь объем образца. Это явление было использовано для инициализации кристаллизации воды с помощью так называемых инициаторов кристаллизации, представляющих собой тонкую трубочку, заполненную исследуемым материалом и выходящую из кюветы с образцом за пределы теплоизоляции образца в объем морозильной камеры [5]. В последующем с использованием инициаторов кристаллизации в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси было разработано устройство для исследования температуры начала замерзания воды в грунтах и растворах [6]. В настоящее время с целью повышения точности метода это устройство и методику соответствующих исследований предлагаются усовершенствовать.

**Конструкция устройства и установка.** На рис. 2 представлены конструкция модернизированного устройства и установка для определения температуры начала замерзания воды в грунтах и растворах. Варианты конструкции устройства могут быть предусмотрены от двух до четырех одновременно исследуемых образцов грунтов, горных пород и поровых растворов в закрытых латунных гильзах 1, которые размещаются в отверстиях массивного металлического корпуса 2. Благодаря дистанционным кольцам 3, гильзы и корпус не соприкасаются между собой. Через верхние пробки латунных гильз в материал введены медно-константановые термопары, помещенные в медицинские иглы 4. Снизу гильзы закрыты пробками, через которые пропущены пластмассовые трубы диаметром 5 мм, исполняющие роль инициаторов кристаллизации 6. Трубы заполнены тем же материалом, что и латунные гильзы. Закрытый конец инициаторов кристаллизации на 20–40 мм выходит за пределы теплоизоляции 5, а открытые концы контактируют с материалом в латунных гильзах. Устройство, установленное на подставку из эбонита 7 и закрытое крышкой 8, помещают в морозильную камеру при температуре термостатирования на 8–10 °C ниже предполагаемой температуры начала замерзания исследуемых образцов. Указанная температура морозильной камеры необходима для гарантированного

замерзания воды в инициаторах кристаллизации. Провода термопарных датчиков температуры, контролирующих температуру образцов, выпускают через отверстие в крышке, и нулевые спаи этих датчиков термостатируют в термосе со льдом 9.



**Рис. 2. Схема устройства для определения температур начала замерзания растворов и воды в дисперсных материалах:** 1 – гильза с образцом; 2 – корпус; 3 – кольцо дистанционное; 4 – датчик температуры; 5 – теплоизоляция; 6 – инициатор кристаллизации; 7 – основание; 8 – крышка; 9 – ноль-термостат; 10 – АЦП-ЦАП; 11 – компьютер; 12 – охранный нагреватель; 13 – батарея контрольных дифференциальных термопар; 14 – блок усиления мощности (БУМ)

**Fig. 2. Schematic diagram of the device for determining the freezing onset temperatures of solutions and water in dispersed materials:** 1 – sample sleeve; 2 – housing; 3 – remote ring; 4 – temperature sensor; 5 – thermal insulation; 6 – crystallisation initiator; 7 – base; 8 – cover; 9 – zero-thermostat; 10 – ADC-DAC; 11 – computer; 12 – guard heater; 13 – battery of control differential thermocouples; 14 – power amplification unit

Анализ выполненных исследований по определению температуры начала замерзания воды в грунтах и растворах показал, что погрешности данных определений, оцененные с помощью калориметрического метода и тестовых определений на растворах с известными концентрациями солей, зависят от интенсивности (скорости) охлаждения, а скорость охлаждения – от температуры термостатирования, т. е. от температуры в морозильной камере. Для обеспечения независимого от температуры в морозильной камере регулирования интенсивности охлаждения образцов предлагается модернизировать рассматриваемое устройство путем дополнения его охранным нагревателем 12, помещенным на корпус устройства, и батареей контрольных дифференциальных термопар 13, встроенной в слой теплоизоляции устройства. Это дает возможность путем регулирования напряжения питания нагревателя снизить перепад температуры в слое изоляции и замедлить скорость охлаждения в период вероятного начала замерзания исследуемых образцов, что повысит точность определения температуры начала замерзания.

Принцип работы установки основан на регистрации кинетики изменения температуры исследуемых образцов в ходе их охлаждения. Переохлаждение воды при этом сводится к минимуму (не более 0,4–0,8 °C) за счет применения в данной установке инициаторов кристаллизации и оптимизации интенсивности охлаждения. Промерзание образца начинается снизу от инициатора кристаллизации по мере достижения поровой влагой температуры начала замерзания. Для регистрации кинетики изменения температуры установка укомплектована компьютерной системой, включающей компьютер типа PC AT 11 с четырехканальным портом 10 и блоком усиления мощности БУМ 14, разработанными УП «УНИТЕХПРОМ БГУ». Созданное в лаборатории программное обеспечение позволяет визуализировать и регистрировать динамику изменения температуры в ходе опыта с ошибкой, не превышающей 0,03 °C. Температура начала замерзания воды в горных породах и растворах определяется по характерным точкам на термограмме охлаждения образца.

Следует отметить, что погрешность определения температуры замерзания воды в дисперсных средах и растворах в основном зависит от учета вымерзания воды в процессе переохлаждения. В представленном методе эта погрешность минимизирована до величины не более 0,15 °C. Более точное определение температуры начала замерзания можно получить с помощью калориметра [7] путем

дополнительного учета тепловых эффектов, но с учетом трудоемкости и длительности процесса определения калориметрическим методом представленный метод может использоваться на стадии предварительных исследований для экспрессного определения температуры начала замерзания воды больших партий образцов грунтов, горных пород и поровых растворов с оценкой эффективной концентрации солей.

**Методика проведения опытов.** При определении температуры замерзания поровой влаги латунные гильзы и инициаторы кристаллизации заполняют исследуемым материалом. Затем инициаторы через резиновую пробку вставляют в гильзы. При сборке необходимо обеспечить хороший контакт материала в гильзе с материалом кристаллизатора.

При определении температуры начала замерзания растворов инициаторы кристаллизации заполняют кварцевым песком, или в них вставляют свернутый бумажный фильтр, после чего для пропитки погружают в исследуемый раствор. Затем их вставляют в гильзу, которую заполняют исследуемым раствором.

После погружения в исследуемый грунт или раствор измерительного спая термопары гильзы вставляют в корпус и закрывают плотной крышкой. Собранные установки помещают в морозильную камеру, температура которой на 8–10 °C ниже предполагаемой температуры начала замерзания. Датчики температуры через соединительные провода подключают к регистрирующим приборам.

В собранной установке часть каждого кристаллизатора расположена в свободном объеме подставки, которая сообщается с пространством морозильной камеры. Поэтому вода в инициаторе кристаллизации достаточно быстро переохлаждается и замерзает. В кассете исследуемый материал охлаждается медленнее из-за значительной теплоемкости металлического стакана и наличия теплоизоляции. Понижение температуры образцов и градиент температуры в слое теплоизоляции контролируются с помощью регистрирующей аппаратуры. Следует отметить, что в случае, если конструкция устройства предусмотрена для одновременного исследования двух образцов, температура образцов и градиент температуры в слое теплоизоляции контролируются и регулируются с помощью компьютерной системы. В конструкциях для трех и четырех одновременных исследований температура образцов контролируется с помощью компьютерной системы, а градиент температуры в слое теплоизоляции контролируется и регулируется с помощью измерителей регуляторов типа Овен.

В начальный период интенсивность изменения температуры должна составлять 10–15 °C/ч. С приближением температуры к области предполагаемого начала замерзания включается охранный нагреватель, который обеспечивает снижение интенсивности изменения температуры до 0,2–0,4 °C/ч, не изменяя температуры в морозильной камере. Такой подход позволяет быстро снизить температуру образцов до зоны фазового перехода воды в лед, а затем в медленном режиме охлаждения войти в зону фазовых переходов и при минимальном переохлаждении зафиксировать начало фазовых переходов воды в лед в исследуемых образцах. При этом на мониторе компьютера ведется визуальное наблюдение за изменением температуры исследуемых образцов. После прохождения характерных точек на кривых охлаждения и выхода всех исследуемых образцов на понижение температуры после переохлаждения, повышения температуры до горизонтального участка кривой, файл записывают в базу данных компьютера и опыт прекращают. После окончания опыта установку извлекают из морозильной камеры, снимают крышку корпуса и извлекают латунные гильзы с образцами. Затем после оттаивания образцов из гильз вынимают датчик температуры, инициатор кристаллизации и пробы образцов извлекают для определения влажности методом термостатной сушки. Латунные гильзы и инициатор кристаллизации моют в проточной воде, протирают и вместе со всей установкой просушивают.

**Определение осмотического потенциала влаги в грунтах и горных породах по температуре начала замерзания.** В общем случае понижение температуры начала замерзания воды в грунтах и горных породах определяется действием поверхностных сил на границе раздела влаги и органоминеральной составляющей скелета почвогрунтов, действием капиллярных сил, а также наличием водорастворимых соединений в поровой влаге. Составляющая химического потенциала влаги, обусловленная первыми двумя факторами, носит обобщенное название матричной составляющей. Тензиометры, как правило, фиксируют только матричную составляющую химического потенциала, или капиллярный потенциал.

Для определения осмотического потенциала, или осмотической составляющей химического потенциала, используется криоскопический метод, основанный на использовании однозначной зависимости осмотического потенциала и температуры замерзания порового раствора в водонасыщенных почвогрунтах от концентраций водорастворимых соединений. При влагонасыщении почвогрунтов значение матричного или капиллярного потенциала становится близким к нулю и температура замерзания в такой среде будет определяться только наличием в поровом растворе водорастворимых соединений. Поэтому при проведении исследований образец необходимо вначале увлажнить до состояния полного влагонасыщения.

Понижение температуры замерзания растворов является коллигативным свойством, и его зависимость от концентрации определяется формулой

$$\Delta T = Km, \quad (1)$$

где  $K$  – криоскопическая постоянная (для воды  $K = 1,86 \text{ К}\cdot\text{кг}\cdot\text{моль}^{-1}$ );  $m$  – суммарная молярная концентрация всех растворенных в поровой влаге веществ.

Выражение, связывающее осмотический потенциал с концентрацией и температурой, имеет вид:

$$\Delta\mu_s = \frac{MRT}{\rho_p}, \quad (2)$$

где  $M$  – суммарная молярная концентрация всех растворенных в поровой влаге веществ;  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,314 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}$ );  $T$  – температура при которой проводятся измерения, К;  $\rho_p$  – плотность порового раствора, кг/л.

Молярная и мольная концентрации связаны соотношением

$$M \approx m\rho_p. \quad (3)$$

Соотношение (3) справедливо для растворов, плотность которых близка к плотности воды, т. е. для достаточно разбавленных.

Из выражений (1)–(3) после необходимых подстановок и преобразований следует выражение для расчета осмотического потенциала

$$\Delta\mu_s = \frac{\Delta TRT}{K}. \quad (4)$$

Для проведения опыта при тщательном перемешивании в образец добавляют дистиллированную воду до установления нулевого потенциала влаги. Последний контролируется тензиометром или визуально по признакам появления в образце свободной влаги. После этого определяют температуру начала замерзания влаги в увлажненном образце по вышеприведенной методике.

Используя значение  $\Delta T$  и соотношение влагосодержаний в исходном и увлажненном образцах, рассчитывают  $\Delta\mu_0$  по формуле

$$\Delta\mu_0 = \frac{\Delta T}{K} RT \frac{W}{W_0}, \quad (5)$$

где  $W$  – влагосодержание образца, при котором определяется осмотический потенциал;  $W_0$  – влагосодержание, соответствующее состоянию полного влагонасыщения образца.

Если влагосодержание образца достаточно велико, то возможен другой путь определения осмотической составляющей потенциала влаги. Для этого необходимо на центрифуге отжать необходимый для эксперимента объем поровой влаги, определить температуру начала её замерзания и по формуле (4) рассчитать искомый потенциал.

На основании формул (2) и (3) можно также рассчитать мольную концентрацию водорастворимых соединений в засоленных грунтах и мерзлых:

$$M = \frac{\Delta T}{K} \rho_p \frac{W}{W_0}. \quad (6)$$

**Заключение.** Модернизированная установка и методика для определения температуры начала замерзания воды в грунтах, горных породах и поровых растворах прошли испытания в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем и используются при выполнении исследований по бюджетной и договорной тематикам, связанным с промерзающими грунтами, горными породами и глиносоловыми шламами. В частности, модернизированная установка в настоящее время используется для определения температуры начала замерзания воды в рыхлых горных породах, отобранных на территории Белорусской антарктической станции. Такие исследования позволяют на предварительном этапе оперативно оценить степень физико-химической связности влаги с твердой фазой дисперсных пород и наличие в поровом растворе растворенных веществ.

### Список использованных источников

1. Мотенко, Р. Г. Температура начала замерзания и фазовый состав влаги грунтов различного гранулометрического состава при нефтесолевом загрязнении / Р. Г. Мотенко, Э. С. Гречишцева // Материалы пятой конф. геокриологов России, Москва, 14–17 июня 2016 г. – М. : Университетская книга, 2016. – Т. 3. – С. 69–76.
2. Закономерности кристаллизации воды при промерзании дисперсных грунтов / В. Н. Голубев [и др.] // Криосфера Земли. – 2018. – Т. XXII, № 1. – С. 20–26.
3. Колунин, В. С. Метод «начала кристаллизации» воды для определения температуры начала замерзания грунтов / В. С. Колунин, З. А. Ишкова // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 6. – С. 3–7.
4. Определение температуры начала замерзания грунтов на основе измерения потенциала поровой воды / Е. М. Чувилин [и др.] // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XXIV, № 6. – С. 11–20.
5. Бровка, Г. П. Установка для определения температуры начала замерзания в грунтах и растворах / Г. П. Бровка, И. В. Дедюля // Информационный листок о научном достижении. – № 90-67. – БелНИИНТИ Госплана БССР.
6. Комплекс методов экспериментального исследования процессов тепломассопереноса в промерзающих грунтах и горных породах / Г. П. Бровка [и др.] // Материалы пятой конф. геокриологов России, Москва, 14–17 июня 2016 г. – М. : Университетская книга, 2016. – Т. 3. – С. 11–17.
7. Бровка, А. Г. Приборы и методы исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды горных пород при отрицательных температурах / А. Г. Бровка, И. И. Романенко // Горная механика. – 2009. – № 1. – С. 71–79.

### References

1. Motenko R. G., Grechishcheva E. S. *Temperatura nachala zamerzaniya i fazovyyj sostav vlagi gruntov razlichnogo granulometricheskogo sostava pri neftesolevom zagryaznenii* [Freezing onset temperature and phase composition of soil moisture of different granulometric composition at oil-salt pollution]. *Materialy pyatoj konf. geokriologov Rossii* [Proc. Fifth Conf. of Geocryologists of Russia]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2016, vol. 3, pp. 69–76. (in Russian)
2. Golubev V. N., e.a. *Zakonomernosti kristallizacii vody pri promerzaniyu dispersnyh gruntov* [Regularities of water crystallisation at freezing of dispersed soils]. *Kriosfera Zemli = Cryosphere of the Earth*, 2018, vol. XXII, no.1, pp. 20–26. (in Russian)
3. Kolunin V. S., Ishkova Z. A. *Metod "nachala kristallizacii" vody dlya opredeleniya temperatury nachala zamerzaniya gruntov* [Method of water 'crystallisation onset' for determining the freezing start temperature of soils]. *Kriosfera Zemli = Earth Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, no. 6, pp. 3–7. (in Russian)
4. Chuvilin E. M., e.a. *Opredelenie temperatury nachala zamerzaniya gruntov na osnove izmereniya potenciala porovoj vody* [Determination of the soil freezing onset temperature based on the measurement of the pore water potential]. *Kriosfera Zemli = Earth Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, no. 6, pp. 11–20.
5. Brovka G. P., Dedyulya I. V. *Ustanovka dlya opredeleniya temperatury nachala zamerzaniya v gruntah i rastvorah* [Installation for determining the freezing start temperature in soils and solutions]. *Informacionnyj listok o nauchnom dostizhenii = Information Sheet on Scientific Achievement*, no. 90–67, BelNIINTI of the State Planning Committee of the BSSR. (in Russian)
6. Brovka G. P., e. a. *Kompleks metodov eksperimental'nogo issledovaniya processov teplomassoperenosa v promerzayushchih gruntah i gornyh porodah* [Complex of methods for experimental study of heat and mass transfer processes in freezing soils and rocks]. *Materialy pyatoj konf. geokriologov Rossii* [Proc. Fifth Conf. of Geocryologists of Russia]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2016, vol. 3, pp. 11–17. (in Russian)
7. Brovka A. G., Romanenko I. I. *Pribory i metody issledovaniya teplofizicheskikh harakteristik i fazovogo sostava vody gornyh porod pri otricatel'nyh temperaturah* [Devices and methods for studying the thermophysical characteristics and phase composition of rock water at subzero temperatures]. *Gornaya mekhanika = Mining Mechanics*, 2009, no. 1, pp. 71–79. (in Russian)

### Информация об авторах

**Бровка Андрей Геннадьевич** – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: andrew\_brovka@rambler.ru

**Дедюля Иван Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dedyulyaivan@yandex.by

### Information about the authors

**Andrey G. Brovka** – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: andrew\_brovka@rambler.ru

**Ivan V. Dedyulya** – 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: dedyulaivan@yandex.by

## СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОРФОМИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Э. Томсон, Т. Я. Царюк, Т. В. Соколова, В. С. Пехтерева, А. С. Марзан

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Изучены водно-физические и сорбционные свойства карбонатсодержащих минералов (мел, доломитовая мука, трепел) как компонентов композиционных сорбционных материалов на основе торфа.

Получены образцы гранулированных композиционных сорбционных материалов на основе торфа и указанных выше карбонатсодержащих минералов с содержанием последних 25 и 50 %. Показано, что поглощение аммиака в сформованных композициях снижается, причем добавка в композицию карбоната кальция (мела) в количестве 25 % в меньшей степени влияет на количество поглощенного аммиака по сравнению с такой же добавкой доломитовой муки и трепела. Водопоглощение композитов по сравнению с гранулированным торфом снижается незначительно.

Установлено, что введение доломитовой муки и трепела в количестве 25 % увеличивает прочность композитов на истирание, что связано с процессами структурообразования через взаимодействие функциональных групп торфа с ионами металлов.

Изучена кинетика поглощения аммиака и воды в газовой фазе торфом и торфоминеральными сорбентами. Установлено, что наиболее интенсивно аммиак поглощается в течение первых двух-трех суток, затем интенсивность поглощения падает. Проведена оптимизация состава и разработана рецептура торфоминерального сорбента.

**Ключевые слова:** торф; минеральная добавка; композиционный торфоминеральный сорбент; сорбция аммиака.

**Для цитирования.** Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Пехтерева В. С., Марзан А. С. Сорбционные свойства композиционных торфоминеральных материалов // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 137–145.

## SORPTION PROPERTIES OF COMPOSITE PEAT MINERAL MATERIALS

А. Е. Tomson, Т. Ya. Tsaryuk, Т. V. Sokolova, V. S. Pekhtereva, A. S. Marzan

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

**Abstract.** The water-physical and sorption properties of carbonate-containing minerals (chalk, dolomite flour, tripoli) as components of composite sorption materials based on peat were studied.

Samples of granular composite sorption materials based on peat and the above carbonate-containing minerals containing the latter of 25 and 50 % were obtained. It has been shown that the absorption of ammonia in the molded compositions is reduced, and the addition of calcium carbonate (chalk) to the composition in an amount of 25 % has a lesser effect on the amount of absorbed ammonia compared to the same addition of dolomite flour and tripoli. The water absorption of composites is slightly reduced compared to granulated peat.

It has been established that the introduction of dolomite flour and tripoli in an amount of 25 % increases the abrasion strength of composites, which is associated with structure formation processes through the interaction of peat functional groups with metal ions.

The kinetics of ammonia and water adsorption in gas phase by peat and peat-mineral sorbents has been studied. It has been established that ammonia is absorbed most intensively during the first two to three days, then the intensity of absorption decreases. The composition was optimized and the formulation of peat-mineral sorbent was developed.

**Keywords:** peat; mineral additive; composite peat-mineral sorbent; ammonia sorption.

**For citation.** Tomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Pekhtereva V. S., Marzan A. S. Sorption properties of composite peat mineral materials. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 137–145.

**Введение.** Одним из новых и эффективных направлений, развиваемых в последнее время в области сорбционных материалов и технологий их использования, является получение сложных композиционных структур, направленное регулирование свойств которых позволяет не только сохранить положительные свойства исходных составляющих композиции, но и придать им новое качество.

Природные минералы широко используются при создании гигиенических сорбционных материалов для животных, причем как сами по себе, так и в композициях с органическими наполнителями.

Такие минералы, как цеолит, диатомит, опока, трепел, бентонит, глауконит, вермикулит и другие, считаются природными сорбентами и обладают достаточно высокой пористостью, водопоглощением и сорбционной емкостью.

Однако наиболее широкое применение природные минеральные компоненты нашли в композициях с органическими, в основном растительного происхождения. Например, предложены композиционный мелкогранулированный подстилочный материал, содержащий известняковый песок; морские раковины, смешанные с 10–20 % опилок или торфа [1]; гранулированная адсорбирующая композиционная подстилка, включающая смесь адсорбирующих частиц (целлюлозный материал или глина) и инертных адсорбирующих гранул (например, вулканической породы), обработанных нейтрализующим агентом (карбонатом, бикарбонатом или гидрофосфатом) [2]; подстилка на основе отработанных активированных углей и диатомовой земли [3].

В патентной литературе описан ряд композиционных сорбционных материалов на основе торфа. Например, в качестве поглотителя газов, в частности сероводорода, предлагается использовать композицию, содержащую, %: верховой торф – 60–80; опилки древесные – 10–20, угольную пыль кокса – 5–10; поташ ( $K_2CO_3$ ) – 5–10 [4]. Также патентуется подстилка для животных на основе гранулированного верхового торфа (45–95 %) с добавлением каолиновой глины (50–10 %) [5].

Предложена подстилка для птицы, представляющая собой насыпной ковер, в состав которого входят термомодифицированные опилки (60–80 %), верховой торф (10–20) и мука цеолитовая (10–30 %) [6]. Применяемая в подстилке цеолитовая мука имеет пористую структуру, хорошо адсорбирует влагу и запахи и используется как адсорбент органоминерального комплекса, содержащегося в помете. При этом при утилизации использованной подстилки в качестве удобрения цеолит «держит» в себе компоненты удобрения, благодаря чему они усваиваются растениями постепенно в течение всего вегетационного периода.

Патентуется подстилочный материал для цыплят-бройлеров или кур-несушек, содержащий верховой торф средней степени разложения – 30 %, соломенную резку – 45, глауконит – 15, доломитовую муку – 10 % [7]. Минерал глауконит снижает концентрацию аммиака, микотоксинов и других токсичных компонентов, образующихся в организме животных при пищеварении, а также обогащает кальцием, железом и микроэлементами подстилку, которая затем используется в качестве удобрения. Доломитовая мука, богатая магнием, дополняет и частично заменяет в составе подстилки глауконит.

Анализ патентной литературы показал, что наибольшее применение в качестве компонентов гигиенических сорбционных материалов нашли кремнийсодержащие и карбонатные природные минералы, такие как бентонит, вермикулит, доломит, мел.

Использование глинистых минералов белорусских месторождений различного состава для создания композиций на основе торфа с целью получения полифункциональных сорбционных материалов предопределется сорбционными свойствами самой минеральной составляющей, возможностью направленного влияния на структурные характеристики композиций (повышение прочности, снижение пылеобразования), а также биосферной совместимостью.

Цель работы – получить композиционные материалы на основе торфа и минеральных составляющих и исследовать их сорбционные свойства.

**Материалы и методы исследования.** Объектами исследования стали композиционные материалы, полученные на основе пущевого торфа ( $R = 35–40\%$ ) торфяного месторождения «Туршовка – Чертово» и минеральных добавок. В качестве добавок использованы достаточно распространенные минералы: карбонатсодержащий минерал трепел, в состав которого входят оксиды кремния, алюминия и кальция (месторождение «Стальное», Могилёвская область); доломитовая мука ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$  – сложный карбонат кальция и магния, ГОСТ 14050-93); мел (ТУ BY 590118065.033-2017) «Красносельское месторождение» Гродненской области.

Определение влажности и зольности образцов проводили по СТБ 2042-2010, насыпную плотность в рабочем состоянии (т. е. с имеющейся влагой) определяли по ГОСТ Р 55955-2024. Прочность на истирание оценивали методом, изложенным в ГОСТ 16188-70. Суммарный объем пор по воде (размер пор –  $(0,5–10,0) \cdot 10^4$  нм) – по ГОСТ 17219-71. Водопоглощение определяли весовым методом, для чего исследуемый образец, помещенный в специальный стаканчик с сетчатым дном, погружали в сосуд с водой на 48 ч. После его насыщения определяли количество поглощенной воды. Значение водопоглощения определяли по формуле

$$B = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100, \%,$$

где  $m$  – масса образца до намокания, г;  $m_1$  – масса образца после намокания, г.

Оценку величины сорбции аммиака и воды проводили экскаторным методом. Чашки Петри с навеской исследуемого образца 10,0 г помещали в экскаторы, содержащие 100 мл водного раствора

аммиака (25 %) или такое же количество дистиллированной воды. Через определенное время чашки Петри извлекали и взвешивали с точностью до четвертого знака. По результатам взвешиваний рассчитывали количество водного раствора аммиака или воды, поглощенных из парогазовой фазы 1 г сорбента. Количество поглощенного аммиака оценивали по разности между привесом водного раствора аммиака и воды. Длительность эксперимента составила 7–8 сут.

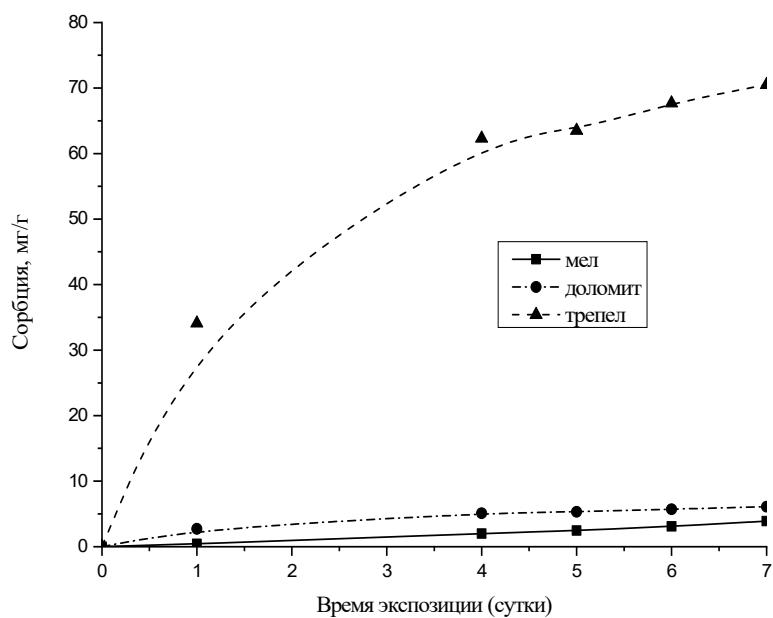
**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 представлены данные по оценке водопоглощения и сорбционных свойств по отношению к аммиаку минеральных компонентов (мел, доломит, трепел). Анализ полученных данных показал, что водопоглощение и поглощение аммиака резко отличаются. Наибольшим водопоглощением (216,8 %) и наименьшей сорбционной активностью по отношению к аммиаку (0,4 мг/г) характеризуется мел. У трепела сорбция аммиака в 85 раз выше, чем у мела и в 12,6 раза выше, чем у доломита. Наименьшее водопоглощение отмечено у доломита (60,1 %). Можно предположить, что такое различие водно-физических и сорбционных свойств минеральных добавок будет оказывать неоднозначное влияние на свойства получаемых композитов.

**Таблица 1. Сорбционные свойства минеральных компонентов**

**Table 1. Sorption properties of mineral components**

Компонент	Водопоглощение, %	Поглощение аммиака, мг/г	Компонент	Водопоглощение, %	Поглощение аммиака, мг/г
Мел	216,8	0,4	Трепел	133,3	34,1
Доломит	60,1	2,7	—	—	—

Исследование кинетики сорбции аммиака минеральными компонентами показало (рис. 1), что скорость его поглощения существенно уменьшается после 96 ч экспозиции.



**Рис. 1. Кинетика сорбции аммиака минеральными компонентами**

**Fig. 1. Kinetics of ammonia sorption by mineral components**

Методом экструзии получены композиционные сорбционные материалы на основе пущицевого торфа и представленных выше карбонатсодержащих минералов с содержанием последних 25 и 50 %.

Увеличение количества минеральных добавок повышает насыпную плотность сорбентов на 11,4–42,0 % в зависимости от вида введенного минерала, причем количество не оказывает существенного влияния на данный показатель (табл. 2).

Водопоглощение композитов по сравнению с гранулированным торфом снижается на 12,0–38,0 % в зависимости от типа и количества введенной добавки.

Объем пор по воде у композитов снижается от 4,9 до 28,7 % в зависимости от количества и вида добавки по сравнению с объемом пор по воде гранулированного торфа. Необходимо также отметить, что количество введенного трепела не влияет на объем пор по воде.

**Таблица 2. Физико-химические и сорбционные свойства лабораторных образцов торфоминеральных сорбционных материалов****Table 2. Physicochemical and sorption properties of laboratory samples of peat-mineral sorption materials**

Показатель	Добавка					
	Без добавки	Мел	Доломитовая мука	Трепел		
Концентрация, %	0	25	50	25	50	25
Влажность, %	16,4	15,3	17,0	20,2	13,4	14,8
Зольность, %	2,2	20,9	35,9	16,1	26,5	11,8
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	376	419	427	534	534	468
Прочность на истирание, %	80,5	87,6	83,0	96,1	83,2	93,7
Водопоглощение, %	164,0	143,6	102,5	143,9	118,1	127,2
Объем пор по воде, см <sup>3</sup> /г	1,01	0,88	0,80	0,96	0,72	0,89
Поглощение аммиака, мг/г	130,3	92,9	36,1	54,6	45,8	75,8
						54,5

Как следует из данных табл. 2, поглощение аммиака композиционными материалами уменьшается. Снижение количества поглощенного аммиака композитами, содержащими мел по сравнению с гранулированным торфом составляет 28,7–72,3 %; доломитовую муку – 58,2–64,8; трепел – 41,8–75,8 %. Необходимо также отметить, что добавка в композицию карбоната кальция (мела) в количестве 25 % в меньшей степени влияет на количество поглощенного аммиака по сравнению с такой же добавкой доломитовой муки и трепела – в 2,0–1,5 раза. Увеличение количества вводимой добавки до 50 % примерно одинаково влияет на сорбцию аммиака композитами.

Введение доломитовой муки и трепела в количестве 25 % увеличивает прочность на истирание композитов на 19,4 и 16,4 % соответственно по сравнению с гранулами на основе торфа, 50%-ная добавка увеличивает прочность незначительно. Введение мела в количестве 25 и 50 % увеличивает прочность композитов на 8,8 и 3,1 % соответственно.

Карбонатсодержащие добавки образованы слабыми основаниями и кислотами, а следовательно, реакция среди этих соединений близка к нейтральной. В процессе введения данных карбонатсодержащих добавок они не приводят в целом к существенному изменению кислотно-щелочного баланса бинарной системы, а следовательно, к перестройке системы водородных связей матрицы. Учитывая, что константы диссоциации карбоксильных групп гуминовых кислот торфа ( $10^{-3}...10^{-5}$ ) несколько выше констант диссоциации угольной кислоты ( $10^{-4}...10^{-7}$ ), в контактных зонах «органическое вещество торфа – минеральный наполнитель» возможно протекание ионообменных реакций по схеме

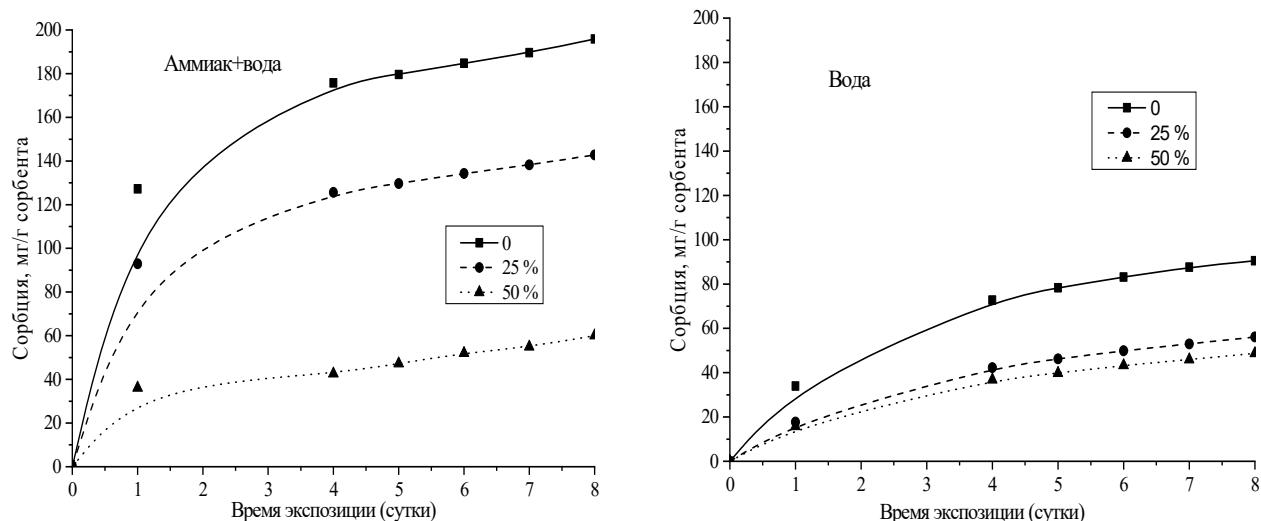


Увеличение содержания ионов кальция в торфе стабилизирует развитие межагрегатных связей. В этом случае проявляется взаимодействие между компактными агрегатами и продуктами разрушения структур первого рода через функциональные группы посредством ионов  $\text{Ca}^{2+}$ . Развитию межагрегатных связей способствует также понижение плотности агрегатов, вызванное увеличением электростатического отталкивания звеньев макромолекул гуминовых веществ вследствие превышения числа основных ионогенных групп над кислотными. Вследствие того, что в верховых малозольных торфах степень ионизации ионообменных центров по сравнению с низинными невысока, в присутствии карбонатсодержащих минералов процессы структурообразования будут протекать в них более интенсивно. Это заключение экспериментально подтверждается повышением прочности для композиционных материалов, полученных на основе верхового торфа с добавками карбонатсодержащих минералов.

Кинетика поглощения аммиака и паров воды композитов и гранул исходного торфа, которые изучали эксикаторным способом в течение 7 сут. (168 ч), представлена на рис. 2–4.

Установлено, что карбонатсодержащие минеральные добавки в концентрации 25 % в большинстве случаев снижают сорбционные характеристики композиционных материалов на основе торфа. Однако увеличение концентрации минеральных добавок по-разному влияет на способность композиционных материалов поглощать аммиак и воду. Во всех случаях наиболее интенсивно аммиак сорбируется в течение первых трех суток, затем интенсивность поглощения существенно падает.

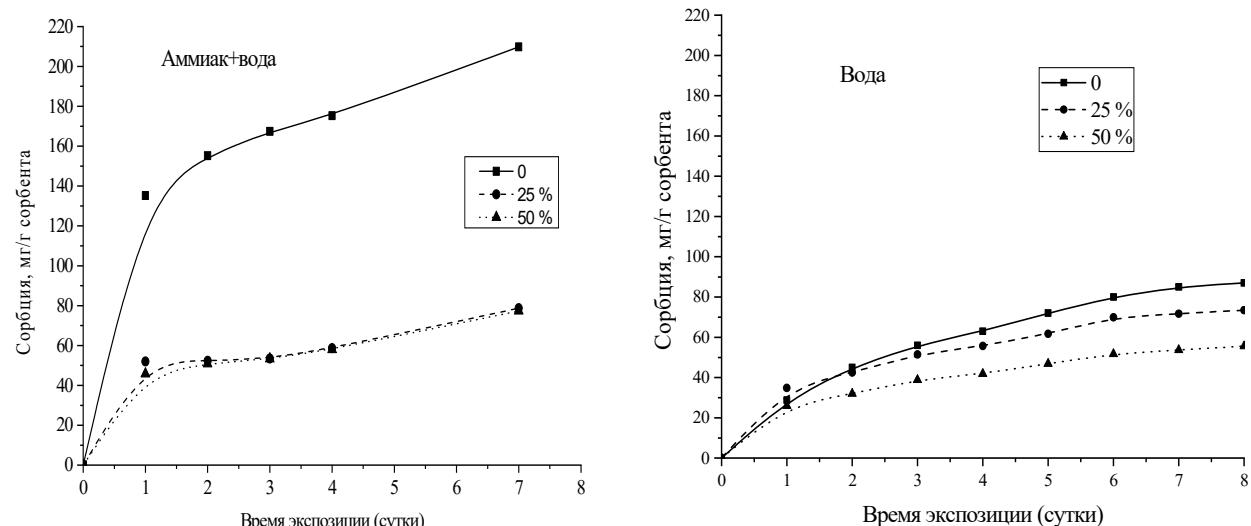
Увеличение содержания мела с 25 до 50 % практически не влияет на способность торфоминеральной композиции поглощать воду, но снижает сорбционную активность по отношению к аммиаку практически в 3 раза (см. рис. 2).



**Рис. 2. Кинетика сорбции аммиака и воды в газовой фазе в зависимости от содержания мела в торфоминеральном сорбенте**

**Fig. 2. Kinetics of ammonia and water sorption in the gas phase depending on the content of chalk in the peat-mineral sorbent**

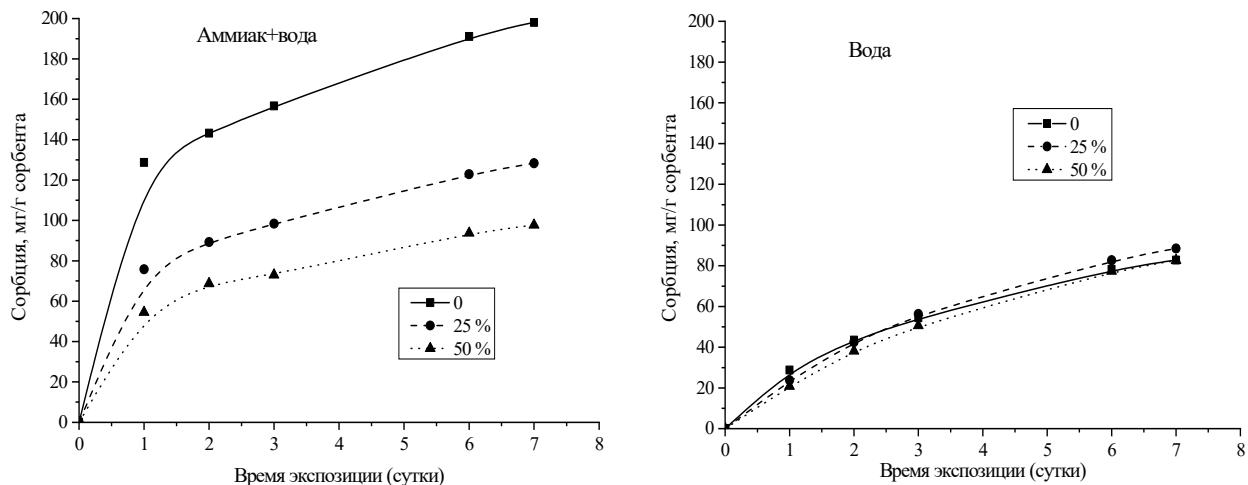
Введение доломитовой муки в концентрации 25 % уменьшает сорбцию аммиака более чем в 3 раза, но на способность поглощать воду существенно не влияет (см. рис. 3). Увеличение концентрации доломита до 50 % не оказывает влияния на способность композитов поглощать аммиак, в то же время способность поглощать воду заметно снижается.



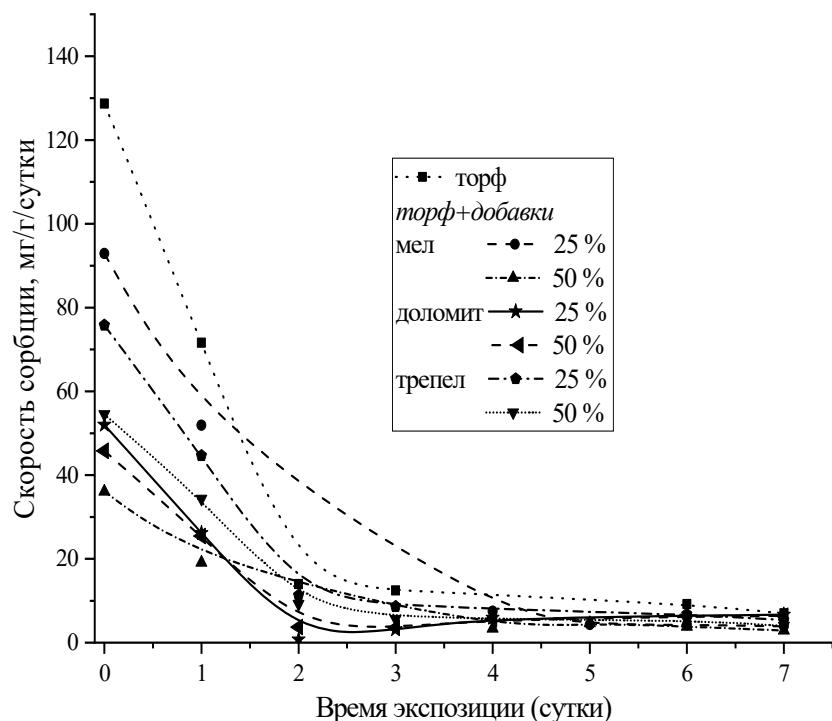
**Рис. 3. Кинетика сорбции аммиака и воды в газовой фазе в зависимости от содержания доломитовой муки в торфоминеральном сорбенте**

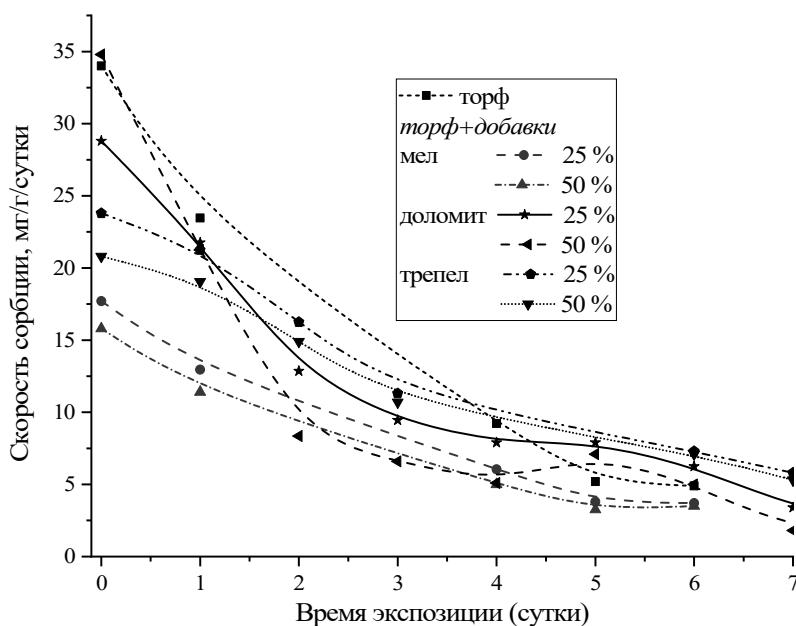
**Fig. 3. Kinetics of ammonia and water sorption in the gas phase depending on the content of dolomite flour in a peat-mineral sorbent**

Использование трепела как компонента композиционного сорбционного материала в концентрации 25 % приводит к снижению сорбционной активности по аммиаку практически в 2 раза, а увеличение его содержания в композите до 50 % вызывает дальнейшее падение этой характеристики (см. рис. 4). В то же время трепел в концентрации до 50 % не оказывает негативного влияния на способность торфа поглощать воду (см. рис. 4).



Представленные на рис. 5 и 6 данные о скорости сорбции аммиака и воды в парогазовой фазе свидетельствуют о замедлении этих процессов с течением времени, однако, если при сорбции воды снижение скорости происходит линейно, за исключением композитов, содержащих 50 % доломита, то изменение скорости сорбции аммиака описывается в основном экспоненциальным уравнением, и ее заметное снижение происходит уже через 1 сут. экспозиции.





**Рис. 6. Скорость сорбции паров воды композициями торфа с карбонатсодержащими добавками**

**Fig. 6. The rate of water vapor sorption by peat compositions with carbonate-containing additives**

Для оптимизации состава композиционного торфоминерального сорбента использованы методы математического планирования эксперимента [8, 9]. Оптимизация выполнена на примере композиции торфа с доломитовой мукой.

В качестве оптимизируемых параметров выбраны следующие эксплуатационные показатели сорбента:

$y_1$  – водопоглощение;

$y_2$  – прочность на истирание;

$y_3$  – поглощение аммиака в течение 24 ч;

$y_4$  – суммарный объем пор по воде.

Влияющими факторами, определяющими значения оптимизируемых параметров, являлись концентрация модифицирующей добавки ( $x_1$ ) и содержание в композиционном материале воды ( $x_2$ ), характеризуемое влажностью композита. Концентрация модифицирующей добавки ( $x_1$ ) находилась в пределах 10–20 %, влажность – в пределах 15–35 %.

С учетом значений критериев Стьюдента и Фишера, определяющих статистически значимые коэффициенты уравнения регрессии для каждого показателя и адекватность выбранной модели, получены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = 120,1 - 23,2x_2,$$

$$y_2 = 87,0 - 2,7x_1 - 6,8x_2,$$

$$y_3 = 94,9 - 2,9x_1 - 17,4x_2,$$

$$y_4 = 1,0 - 0,10x_1 - 0,10x_2.$$

Анализ полученных уравнений позволил установить, что прочность гранул сорбционного материала на истирание и их способность поглощать аммиак обусловлены как содержанием минеральной добавки, так и влажностью гранул, и, судя по коэффициентам регрессии, влажность оказывает более существенное влияние на свойства сорбента, чем содержание минеральной добавки. Влияющим фактором водопоглощения сорбента является только его влажность. Следует подчеркнуть, что отрицательные значения коэффициентов регрессии свидетельствуют о необходимости уменьшения в композиционном сорбенте содержания минеральной добавки (не более 15 %) и влаги (не более 25 %). Известно, что сушка торфа, особенно до воздушно-сухого состояния, является весьма энергозатратным процессом, поэтому в ходе разработки технологии изготовления сорбционного материала необходимо найти компромисс между экономической целесообразностью и качественными характеристиками материала.

Выполненный комплекс исследований по оптимизации состава композиционного сорбционного материала на основе торфа позволил разработать состав торфоминерального сорбента.

**Заключение.** Изучены водно-физические и сорбционные свойства глинистых карбонатсодержащих минералов Республики Беларусь (мел, доломитовая мука, трепел). Установлено, что мел характеризуется наибольшим водопоглощением и наименьшей сорбционной активностью по отношению к аммиаку. У трепела сорбция аммиака выше, чем у мела и доломита. Наименьшее водопоглощение наблюдается у доломита.

Получены композиционные торфоминеральные сорбенты на основе верхового (пушицевого) торфа и карбонатсодержащих минералов с содержанием минеральной составляющей 25 и 50 %. Изучены физико-технические, водно-физические и сорбционные свойства торфоминеральных сорбентов. Показано, что поглощение аммиака композициями пушицевого торфа с карбонатсодержащими минералами снижается, причем добавка в композицию карбоната кальция (мела) в количестве 25 % в меньшей степени влияет на количество поглощенного аммиака по сравнению с такой же добавкой доломитовой муки и трепела. Увеличение вводимой добавки до 50 % примерно одинаково влияет на сорбцию аммиака композитами. Водопоглощение композитов по сравнению с гранулированным торфом снижается незначительно.

Введение доломитовой муки и трепела в количестве 25 % увеличивает прочность на истирание композитов на 19,4 и 16,4 % соответственно по сравнению с гранулами на основе торфа, 50%-ная добавка увеличивает прочность незначительно. Введение мела в количестве 25 и 50 % увеличивает прочность композитов на 8,8 и 3,1 % соответственно.

Изучена кинетика поглощения аммиака и паров воды торфом и торфоминеральными сорбентами. Установлено, что наиболее интенсивно аммиак поглощается в течение первых двух-трех суток, затем интенсивность поглощения падает. Скорость поглощения паров воды всеми изученными композитами практически не изменяется в течение исследованного промежутка времени и не зависит от вида и количества добавки. Проведена оптимизация состава и разработана рецептура торфоминерального сорбента.

#### Список использованных источников

1. Подстилка, содержащая неорганический материал : пат. FR 2518897A1 / Поль Менард. – Опубл. 29.03.1985.
2. Запахопоглощающие материалы и способы их получения и применения : пат. US 9339005B2 / Лин Ван, Томас Визнер, Дэвид Фримен. – Опубл. 17.05.2016.
3. Подстилка для животных : пат. US 4607594A / Крейг Э. Такер. – Опубл. 26.08.1986.
4. Поглотитель газов : пат. RU 2123879 C1 / А. А. Скорохватов, Т. К. Хван, В. Б. Некрасова, Л. А. Гришкова. – Опубл. 27.12.1998.
5. Подстилка для животных : пат. RU 2000128921 / А. Е. Афанасьев, О. С. Мисников, Д. В. Иванов. – Опубл. 20.11.2002.
6. Адсорбционная подстилка для птицы (варианты) : пат. RU 2445770 / В. С. Канталинский, Л. В. Канталинский, Ю. И. Лебедева, И. Л. Пшеничко, С. В. Поспелов. – Опубл. 27.03.2012.
7. Подстилочный материал для цыплят-бройлеров или кур-несушек : пат. BY 20835 / А. Р. Колин. – Опубл. 28.02.2017.
8. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М., 1976. – 280 с.
9. Шеффе, Г. Дисперсионный анализ ; пер. с англ. под ред. Б. А. Севастьянова, В. П. Чистякова. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 512 с.

#### References

1. Paul Ménard. *Podstilka, soderzhashhaya neorganicheskij material* [Litter containing inorganic material]. Patent FR, no. 2518897, 1985. (in Russian)
2. Lin Van, Tomas Vizner, Devid Frimen. *Zapakhopogloshchayushchie materialy i sposoby ikh polucheniya i primeneniya* [Odor-absorbing materials and methods of their production and application]. Patent USA, no. 9339005B2, 2016. (in Russian)
3. Krejg E. Taker. *Podstilka dlya zhivotnykh* [Animal bedding]. Patent USA, no. 4607594A, 1986. (in Russian)
4. Skorohvatov A. A., Khvan T. K., Nekrasova V. B., Grishkova L. A.. *Poglotitel' gazov* [Gas absorber]. Patent RF, no. 2123879, 1998. (in Russian)
5. Afanas'ev A. E., Misnikov O. S., Ivanov D. V. *Podstilka dlya zhivotnykh* [Animal bedding]. Patent RF, no. 2000128921, 2002. (in Russian)
6. Kantalinsky V. S., Kantalinsky L. V., Lebedeva Yu. I., Pshenichko I. L., Pospelov S. V. *Adsorbzionnaya podstilka dlya pticzy (varianty)* [Adsorption litter for poultry (options)]. Patent RF, no. 2445770, 2012. (in Russian)

7. Kolin A. R. *Podstilochnyj material dlya czyplyat-brojlerov ili kur-nesushek* [Litter material for broiler chickens or laying hens]. Patent BY, no. 20835, 2017. (in Russian)
8. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, 1976, 280 p. (in Russian)
9. Sheffe. G. *Dispersionnyy analiz* [Analysis of variance]. Engl. transl. ed. by B. A. Sevastianova, V. P. Chistyakova. Moscow, 1980, 512 p. (in Russian)

### Информация об авторах

**Томсон Алексей Эммануилович** – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

**Царюк Татьяна Яковлевна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

**Соколова Тамара Владимира** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

**Пехтерева Виктория Станиславовна** – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

**Марзан Анастасия Сергеевна** – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr\_29@mail.ru

### Information about the authors

**Alexey E. Tomson** – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of Lab. of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

**Tatiana Ya. Tsaryuk** – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tsariuk9@mail.ru

**Tamara V. Sokolova** – Ph. D. (Technical), Assistant Professor Senior Researcher Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

**Victoriya S. Pehtereva** – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

**Anastasiya S. Marzan** – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr\_29@mail.ru

## АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ГИДРОЛИЗАТОВ И ОКСИДАТОВ СФАГНОВОГО ТОРФА И СФАГНОВОГО МХА

Н. А. Жмакова<sup>1</sup>, Н. Л. Макарова<sup>1</sup>, Е. А. Семенчукова<sup>2</sup>, А. А. Муратова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Представлены результаты исследования antimикробной активности препаратов из сфагнового торфа и сфагнового мха на чистых культурах возбудителей болезней сельскохозяйственных растений методами окисления в щелочной среде и гидролиза в водной среде при повышенной температуре. Установлены условия проведения процессов окисления и гидролиза по параметрам температуры, продолжительности, расхода реагентов и по критерию максимального выхода растворимых соединений. Из сфагнового мха *Sphagnum magellanicum* и трех образцов сфагнового магелланикума-торфа со степенью разложения 5; 10–15 и 20–25 % наработано 11 образцов препаратов, в том числе 9 – методом окисления и 2 – путем гидролиза в водной среде при высокой температуре. С использованием модифицированного метода отсроченного антагонизма изучена биоцидная активность препаратов в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов бактериальной и грибной природы. Установлено, что наиболее высокой антибактериальной активностью против возбудителя бактериозов растений томата *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. обладали три препарата, полученные из магелланикума-торфа со степенью разложения 5 % и 20–25 % методом окисления в среде гидроксида аммония, а также образец, полученный окислением магелланикума-торфа (20–25 %) в среде гидроксидов аммония и натрия (1 : 1) с использованием катализатора окисления – солей кобальта. Водный гидролизат магелланикума-торфа со степенью разложения (R) 5 % проявил активность в отношении двух возбудителей бактериозов растений томата *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000, *C. michiganensis* Н.П. и возбудителя бактериоза плодовых культур *Erwinia amylovora* E2, а магелланикум мха – в отношении двух фитопатогенов – *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 и *C. michiganensis* Н.П. Антифунгального действия ни один препарат не проявил.

**Ключевые слова:** сфагновый торф; сфагновый мох; гидролиз; окисление; физико-химические свойства; antimикробная активность.

**Для цитирования.** Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Семенчукова Е. А., Муратова А. А. Антимикробная активность гидролизатов и оксидатов сфагнового торфа и сфагнового мха // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 146–158.

## ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF THE HYDROLYSATES AND OXIDATES OF SPHAGNUM PEAT AND SPHAGNUM MOSS

N. A. Zhmakova<sup>1</sup>, N. L. Makarova<sup>1</sup>, E. A. Semenchukova<sup>2</sup>, A. A. Muratova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Abstract.** The purpose of this work was to obtain preparations from sphagnum peat and moss by the methods of oxidation in alkaline medium and hydrolysis in aqueous medium at the elevated temperature and initial studies of their antimicrobial activity on the pure cultures of pathogens of the agricultural plants. The conditions of oxidation and hydrolysis processes have been established in terms of temperature, duration, reagent consumption and maximum yield of soluble compounds. From sphagnum moss *Sphagnum magellanicum*, and three samples of sphagnum magellanicum peat with decomposition degree of 5; 10–15 and 20–25 % 11 samples of preparations were prepared, including 9 by oxidation and 2 by hydrolysis in aqueous medium at high temperature. Using the modified method of delayed antagonism, the biocidal activity of the preparations against a number of the phytopathogenic microorganisms of bacterial and fungal nature was studied. It has been found that the highest antibacterial activity against pathogen of tomato plants *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* N.P. had three preparations obtained from magellanicum peat with decomposition the degree of 5 % and 20–25 % by oxidation in ammonium hydroxide medium, as well as a sample obtained by the oxidation of magellanicum peat (20–25 %) in ammonium and sodium hydroxide medium (1 : 1) with the use of oxidation catalyst – cobalt salts. Aqueous hydrolysate of magellanicum peat with R = 5 % showed activity against two pathogens of tomato plants *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000, *C. michiganensis* N.P. and *Erwinia amylovora* E2 – pathogen of fruit

crops, and moss *magellanicum* – against two pathogens *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 and *C. michiganensis* N.P. No antifungal effect was shown by any preparation.

**Keywords:** sphagnum peat; sphagnum moss; hydrolysis; oxidation; physicochemical properties; antimicrobial activity.

**For citation.** Zhmakova N. A., Makarova N. L., Semenchukova E. A., Muratova A. A. Antimicrobial activity of the hydrolysates and oxidates of sphagnum peat and sphagnum moss. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 146–158.

**Введение.** Сфагновые мхи и сфагновый торф можно рассматривать как концентрированный источник соединений отдельных химических классов, проявляющих разнообразные биологические свойства: ростстимулирующие, бактерицидные, фунгицидные, антиоксидантные и др. К таким соединениям можно отнести гуминовые вещества, полисахариды, в том числе полиурониды, уроновые кислоты, фенолкарбоновые кислоты, флавоны, флавоноиды, альдегиды, кумарины, тритерпеновые соединения, органические кислоты разнообразного строения и др. [1, 2]. Сравнение компонентного состава органической части сфагновых мхов и сфагнового торфа показывает, что основное их различие сводится к присутствию в торфе гуминовых веществ, появляющихся при разложении отмерших болотных растений в залежи в процессе микробиологического разложения.

В составе растительного, и в особенности торфяного сырья, органические и минеральные составляющие, как правило, образуют слаборастворимые высокомолекулярные комплексы, поэтому при получении из торфа биологически активных препаратов его органическую часть необходимо максимально активизировать путем воздействия физических и химических методов. В результате такой обработки происходят разрыв связей в органических и органоминеральных комплексах, полная или частичная деструкция высокомолекулярных соединений, улучшение их растворимости в водной или водно-щелочной средах, образование новых биологически активных веществ вторичного происхождения, что позволяет перевести в раствор комплекс соединений с высокой биологической активностью. Перспективным является использование для этих целей методов окислительной и гидролитической деструкции торфа и растений-торфообразователей. Особый интерес представляет получение с использованием этих методов экологически безопасных препаратов для защиты растений от грибных и бактериальных инфекций.

Наиболее простым методом выделения соединений антимикробного действия из сфагновых мхов и торфа является термический гидролиз в водной среде – водная экстракция при повышенной температуре и давлении.

Водный гидролиз сфагнового мха и торфа в автоклавах при повышенной температуре и избыточном давлении приводит к накоплению в реакционной среде водорастворимых соединений, представленных моносахаридами, аминокислотами, органическими кислотами, биогенными аминами, пектинами и рядом других химических соединений, растворимых в горячей воде [3, 4]. Представлял интерес выделение этих водных гидролизатов из сфагнового мха и сфагнового торфа и испытание их антибактериальной и антифунгальной активности. Однако этот метод не позволяет перевести в растворимое состояние трудногидролизуемые вещества (целлюлозу) и гуминовые вещества торфа.

Гуминовые вещества занимают особое место среди биологически активных соединений природного происхождения. Они представляют собой полидисперсные полимеры сложного строения с высокой молекулярной массой. Наиболее активной составляющей гуминовых веществ являются гуминовые кислоты.

С химической точки зрения это группа ароматических оксиоксикарбоновых кислот, объединенных общим принципом строения, но отличающихся в широких пределах по составу в зависимости от материнского вещества и условий гумификации. Строение гуминовых кислот до сих пор не установлено, однако общепризнанным является то, что они содержат в своем составе конденсированные ароматические ядра, соединенные друг с другом через цепи, имеющие достаточное сопряжение углерод-углеродных связей и алифатической периферической части, в состав которой входят компоненты углеводного (полисахариды и полиурониды) и белкового характера, в том числе высокомолекулярные [5].

Структурные особенности гуминовых кислот и присутствие в их составе большого количества функциональных групп различной химической природы – карбоксильных, фенольных, карбонильных, хиноидных, метоксильных, сложноэфириных, спиртовых, гидроксильных и других – обеспечивают их высокую биореакционную способность и проявление разностороннего биологического действия, что вызывает интерес к их испытанию как антимикробных средств. Продукты, содержащие гуминовые вещества, можно рассматривать как перспективные препараты биоцидного действия или компоненты комплексных препаратов этого класса.

Эффективным технологическим приемом химической деструкции органического сырья, в том числе полимеров торфа и растений-торфообразователей, доступным для практической реализации, является гидролиз в присутствии минеральных кислот и щелочей. Это сравнительно мягкий метод деструкции, при котором затрагивается преимущественно периферическая часть молекулы гуминовых кислот. При этом в гидролизатах всегда обнаруживаются соединения углеводов (моно-, ди- и трисахара, олигосахариды, уроновые кислоты и др.) и продукты гидролиза белковых компонентов (аминокислоты, пептиды, амины и др.).

Однако при кислотном гидролизе не растворимы такие важные биологически активные составляющие торфа, как активизированные в его ходе гуминовые кислоты. Поэтому гидролиз торфа в среде минеральных кислот можно рассматривать как первую стадию процесса получения антимикробного препарата. На второй стадии обработка прогидролизованной пульпы щелочными агентами при нагревании дает возможность пополнить гидролизаты модифицированными гуминовыми кислотами, а также соединениями вторичного синтеза типа меланоидинов, которые интенсивно образуются и в щелочной среде.

Таким образом, последовательный гидролиз торфяного сырья в кислой и щелочной средах позволяет эффективно использовать его органические компоненты и получить препарат с высоким выходом.

Продуктами более глубокой деструкции гуминового комплекса торфа могут быть ароматические соединения. Одним из методов частичного расщепления гуминовых кислот и обогащения продуктов деструкции торфа этими соединениями является окисление в щелочной среде. В составе оксидатов, полученных различными способами, от 20 до 60 % могут составлять бензолкарбоновые кислоты в зависимости от условий процесса. Продуктами окисления фенольных структур гуминовых кислот являются ароматические оксикарбоновые кислоты: оксибензойные и оксибензолполикарбоновые, фенолкарбоновые и др. [1].

В результате окисления гумуссодержащего сырья в щелочной среде происходит частичная деструкция макромолекул гуминовых кислот, снижение их молекулярной массы и обогащение кислородсодержащими функциональными группами, что обеспечивает заметное увеличение их растворимости и уровня биологической активности. Кроме этого, образуются биологически активные низкомолекулярные карбоновые кислоты, аминокислоты, фенольные соединения, а также продукты вторичного синтеза меланоидиновой природы. Меланоидины образуются по реакции Майяра на основе первичных продуктов гидролиза и являются одним из биологически активных компонентов гидролизатов и оксидатов торфяного и растительного сырья. Меланоидинообразование – сложный окислительно-восстановительный процесс взаимодействия соединений, имеющих свободные аминогруппы, с веществами, содержащими свободные карбонильные группы. В результате дальнейших химических реакций промежуточные продукты гидролиза превращаются в высококонденсированные азотсодержащие соединения – меланоидины. В синтезе меланоидинов в качестве продуктов, содержащих аминогруппу, могут участвовать аминокислоты, амины, пептиды и белки, а карбонильную группу – углеводы, органические кислоты различного строения, альдегиды, кетоны, фенольные соединения и другие вещества. Реакция меланоидинообразования наиболее интенсивно протекает при повышенной температуре (выше 90 °C) как в кислой, так и в щелочной средах. Биологическая роль меланоидинов очень многообразна. Им присущи ростовые, антиокислительные, антикоагулянтные, антимикробные, антрафунгальные свойства [6].

В случае окисления мха, как и любого гемицеллюлозсодержащего сырья, не содержащего гуминовых веществ, основным биологически активным компонентом полученных продуктов являются меланоидины.

Характер образующихся в процессе гидролиза и окисления соединений и химический состав гидролизатов и оксидатов зависит от технологического режима процесса.

Цель данных исследований – определить технологические условия получения препаратов из сфагнового мха и сфагнового торфа разной степени гумификации методами бескислотного высокотемпературного водного гидролиза и окисления, провести наработку лабораторных образцов препаратов и первичные испытания их биоцидных свойств на чистых культурах возбудителей болезней сельскохозяйственных растений бактериальной и грибной природы.

**Материалы и методы исследований.** Объектами исследований являлись три образца сфагнового торфа сфагnum магелланум *Sph. magellanicum* со степенью разложения (*R*) 5; 10–15 и 20–25 % и сфагновый мох *Sph. magellanicum* (сфагnum магелланум). Магелланум-торф малой степени разложения отбирали из залежи на торфяном месторождении «Червоное» Червенского района Минской области, там же отобран и магелланум-мох. Магелланум-торф со степенью разложения 15–20 % отобран из штабеля на торфопредприятии «Сосновый бор» Смолевичского района Минской области (торфяное месторождение «Радемье»).

Геоботаническая характеристика проб торфа, включающая определение ботанического состава, вида торфа в соответствии с ботанической классификацией и степени его разложения, выполнена в лаборатории биогеохимии и агрономии. Ботанический анализ торфа заключался в определении под микроскопом в отмытых от гумуса растительных волокнах процентного содержания остатков различных видов растений-торфообразователей.

Результаты геоботанических исследований приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Геоботаническая характеристика образцов торфа****Table 1. Geobotanical characterization of peat samples**

Номер образца	Ботанический состав, %	Вид	Тип	Степень разложения, %
1	Пушица – 5 Сфагnum магелланикум – 75 Сфагnum фускум – 15 Сфагnum апикулятум – 5 Шейхцерия – ед.	Сфагnum магелланикум	Верховой	5
2	Сфагnum магелланикум – 65 Сфагnum фускум – 15 Сфагnum ангустифолиум – 15 Пушица – 5			10–15
3	Сфагnum магелланикум – 70 Сфагnum апикулятум – 20 Сфагnum фускум – 5 Пушица – 5 Кора сосны – ед.			20–25

Определение массовой доли влаги торфа проводили в соответствии с действующим типовым методом. После высушивания в сушильном шкафу при температуре 105–110 °C до постоянной массы вычисляли потери массы взятой навески в процентах.

Массовую долю золы определяли по процентному соотношению массы остатка, образующегося после полного сжигания абсолютно сухой навески образца торфа или мха в муфельной печи при температуре  $800 \pm 25$  °C, к общей массе исходной навески. Массовую долю органического вещества образца определяли как разность сухого вещества и золы.

Гидролитическую и окислительную деструкцию торфа и мха осуществляли при избыточном давлении в специальных герметически закрывающихся толстостенных сосудах из нержавеющей стали объемом 500 см<sup>3</sup>. Ампулы с реакционной смесью (мох или торф + вода + реагенты) выдерживали в терmostате при необходимой температуре заданное время, затем охлаждали в проточной воде до комнатной температуры. После охлаждения ампулы вскрывали, содержимое разделяли центрифугированием на жидкую фазу (целевой продукт) и твердый остаток.

При установлении оптимальных температурных параметров водного гидролиза процесс проводили при температуре от 100 до 180 °C в течение 3 ч, а оптимальной продолжительности гидролиза – в течение 1; 2 и 3 ч при температуре 160 °C. В водных гидролизатах определяли выход органических веществ и редуцирующих соединений (до и после инверсии).

Исследование влияния технологических параметров на выход и состав продуктов окисления торфа и мха проведено по температурным, расходным показателям и продолжительности процесса. Влияние расхода щелочного агента на выход и состав продуктов окислительной деструкции торфа исследовали в пределах 20–60 % от органической массы сырья. При этом в опытах использовали три типа щелочных агента – гидроксид натрия, гидроксид аммония и их смесь в соотношении 1 : 1. Влияние расхода окислителя – пероксида водорода – на выход препарата изучали в серии опытов, где расход реагента в реакционной среде составлял 10; 15; 20 и 25 % на органическую массу исходного сырья, а продолжительность процесса – 1; 2; 3 и 4 ч, влияние температуры окисления исследовали в диапазоне 100–150 °C.

Один образец оксиidata из малелланикум-торфа со степенью разложения 20–25 % получен с использованием катализатора окисления – соли кобальта.

Наработанные препараты охарактеризованы по ряду физико-химических показателей: массовой доле сухих веществ, массовой доле органических веществ, зольности, активной кислотности и др. Цвет препаратов оценивали визуально, плотность измеряли ареометром, реакцию среды – при помощи ионометра И-120.1, массовую долю сухих и органических веществ – весовым методом.

Исследование антимикробной активности полученных гидролизатов и оксиidata выполнено специалистами Института микробиологии НАН Беларуси на чистых культурах фитопатогенов бактериальной и грибной природы. Для ее оценки использовали фитопатогенные микроорганизмы сельскохозяйственных культур, выделенные на территории Беларуси, коллекционные штаммы из фонда Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов и штаммы из коллекции «Центр аналитических и генно-инженерных исследований» (табл. 2).

**Таблица 2. Штаммы фитопатогенных бактерий и грибов, использованные в работе****Table 2. Strains of phytopathogenic bacteria and fungi used in the work**

Штамм	Микроорганизм	Источник выделения / кем выделен	Возбудитель (его действие) и (или) вызываемое(ые) заболевание(я)
<i>Мицелиальные грибы</i>			
БИМ F-544	<i>Aspergillus niger</i> ( <i>A. niger</i> )	Очаги плесневого поражения / получен от лаборатории экспериментальной микробиологии и биоповреждений, Институт микробиологии НАН Беларуси	Поражает деревянные материалы
БИМ F-551	<i>Botrytis cinerea</i> ( <i>B. cinerea</i> )	Листья капусты / Купцов В. Н., Институт микробиологии НАН Беларуси	Возбудитель серой гнили капусты
381	<i>Fusarium oxysporum</i> ( <i>F. oxysporum</i> )	—	Вызывает корневые гнили овощных культур
БИМ F-568	<i>Alternaria alternata</i> ( <i>Alt. alternata</i> )	Плоды яблони / Институт микробиологии НАН Беларуси	Возбудитель альтернариоза овощных культур и плодовых деревьев
F4	<i>Alternaria</i> sp. ( <i>Alternaria</i> sp.)	—	Возбудитель альтернариоза овощных культур и плодовых деревьев
<i>Бактерии</i>			
Н.П.	<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i> ( <i>C. michiganensis</i> )	Томат сорта «Раиса» / Мямин В. Е., биологический факультет Белорусского государственного университета	Бактериозы растений томата
3'	<i>Pseudomonas corrugata</i> ( <i>P. corrugata</i> )	Томат сорта «Раиса» / Мямин В. Е., биологический факультет Белорусского государственного университета	Некроз сердцевины стеблей томата
DC3000	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i> ( <i>P. syringae</i> pv. <i>tomato</i> )	Коллекционный штамм	Бактериозы растений томата
E2 (БИМ В-641 Г)	<i>Erwinia amylovora</i> ( <i>E. amylovora</i> )	Листья яблони / Лагоненко А. Л., биологический факультет Белорусского государственного университета	Бактериальный ожог плодовых культур
25.1	<i>Pectobacterium carotovorum</i> ( <i>Pec. carotovorum</i> )	Огурец сорта «Кураж» / Мямин В. Е., биологический факультет Белорусского государственного университета	Мягкие гнили овощных культур

Глубинное культивирование бактерий осуществляли в полноценной среде LB [7] с аэрацией (200 об/мин) при температурах 28–30 °C в течение 24–48 ч. Мицелиальные грибы выращивали в картофельно-глюкозном бульоне [8] с перемешиванием 120–160 об/мин при температуре 24 °C в течение 48 ч. Также исследуемые штаммы культивировали на агаризованной питательной среде (полнозаданный питательный агар (ППА)) [9] с содержанием агар-агара 0,7 или 2,0 %. Клетки культивировали в течение 24–48 ч при температурах 24–30 °C. Выросшие штаммы визуально анализировали на однородность формы и отсутствие колоний посторонних микроорганизмов.

Культуры фитопатогенных микроорганизмов выращивали до логарифмической фазы роста, которую устанавливали по оптической плотности культуры. Для определения оптической плотности извлекали 1 мл культуры и измеряли оптическую плотность при длине волн 600 нм (ОП<sub>600</sub>) с помощью спектрофотометра «SP-830 Plus» (Metertech).

Для определения антимикробной активности образцов использовали модифицированный метод отсроченного антагонизма: 500 мклочной культуры фитопатогена переносили к 4,5 мл разогретой до 40–45 °C агаризованной ППА среды с содержанием агар-агара 0,7 %. Интенсивно перемешивали и насыпали на чашки Петри с 20 мл застывшего питательного 2%-ного ППА-агара. После полного застывания среды на чашках Петри на поверхность агара наносили по 15 мкл тестируемых образцов. Также в каждую чашку Петри на поверхность агара наносили контрольный раствор в количестве 15 мкл. Чашки инкубировали при температурах 24–30 °C в течение 24–48 ч. Результаты оценивали визуально, измеряя зоны задержки роста. Эксперимент проводили в трех биологических повторностях.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Установлен групповой химический состав углеводного комплекса образцов магелланикум-мха и магелланикум-торфа разной степени разложения (табл. 3).

**Таблица 3. Групповой химический состав углеводного комплекса магелланикум-мха и магелланикум-торфа**

**Table 3. Group chemical composition of the carbohydrate complex of magellanicum moss and magellanicum peat**

Компоненты, % на органическую массу	Магелланикум- мох	Магелланикум-торф		
		R = 5 %	R = 10–15 %	R = 20–25 %
Водорастворимые вещества, в том числе редуцирующие	9,2 2,0	5,1 1,3	4,6 1,5	3,8 1,3
Легкогидролизуемые вещества, в том числе редуцирующие	52,4 31,6	50,2 27,3	45,7 24,6	34,0 19,2
Трудногидролизуемые вещества, в том числе редуцирующие	21,4 20,3	22,5 21,9	22,8 21,5	23,1 20,9
Сумма гидролизуемых веществ, в том числе редуцирующие	83,0 53,9	77,8 50,5	73,1 48,9	60,9 41,4
Негидролизуемый остаток	17,0	22,2	26,9	39,1

Массовая доля водорастворимых веществ в составе мха в 2,0–2,5 раза превышает их содержание в торфах и составляет для мха 9,2 %, для малоразложившегося торфа – 5,1, а для торфа с наибольшей степенью разложения – 3,8 %. Исследуемые сфагновые торф и мох значительно отличаются по выходу легкогидролизуемых веществ. Наибольшим содержанием соединений этой группы, в том числе редуцирующих веществ, характеризуется магелланикум-мох. В торфах с ростом степени разложения выход легкогидролизуемых веществ закономерно снижается с ростом степени гумификации и лежит в интервале 50,2–34,0. Содержание трудногидролизуемых веществ в образцах мха и торфа отличается незначительно и находится на уровне 21–23 %.

Проведен ряд опытов по установлению наиболее эффективных условий процесса бескислотного гидролиза мха и торфа и влияния температуры, продолжительности процесса, степени разложения торфа на выход водорастворимых и редуцирующих веществ в образующихся продуктах.

Установлены оптимальные параметры температуры и продолжительности гидролиза.

Для оптимизации температурных параметров водного гидролиза процесс проводили при температуре от 100 до 180 °C в течение 3 ч (табл. 4).

**Таблица 4. Влияние температуры процесса на выход водорастворимых и редуцирующих веществ магелланикум-мха и магелланикум-торфа**

**Table 4. Effect of process temperature on the yield of water-soluble and reducing substances of magellanicum moss and magellanicum peat**

Вид сырья	Температура процесса, °C				
	100	120	140	160	180
<i>Выход органических веществ, %</i>					
Магелланикум-мох	8,4	12,3	23,6	37,5	34,5
Магелланикум-торф, 5 %	10,8	16,1	26,9	38,3	37,3
Магелланикум-торф, 10–15 %	7,5	13,2	20,3	31,5	28,1
Магелланикум-торф, 20–25 %	5,4	10,6	18,6	29,9	26,7
<i>Выход редуцирующих веществ, %</i>					
Магелланикум-мох: до инверсии после инверсии	3,4 5,2	5,8 7,5	8,1 13,6	13,6 18,7	11,3 14,5
Магелланикум-торф, 5 %: до инверсии после инверсии	4,2 6,0	6,3 9,1	11,4 15,8	19,5 22,0	18,0 20,1
Магелланикум-торф, 10–15 %: до инверсии после инверсии	3,2 4,3	6,5 7,1	11,0 13,2	15,6 18,1	12,8 14,9
Магелланикум-торф, 20–25 %: до инверсии после инверсии	2,5 3,1	5,0 6,3	10,0 11,9	13,6 16,1	10,3 12,8

Оптимальной температурой для процесса бескислотного гидролиза можно считать температуру 160 °С. При этом в раствор переходит наибольшее количество органических веществ мха и выбранных образцов торфа. С ростом температуры процесса в водорастворимые соединения переходит от 29,9 % (для торфа с  $R = 20\text{--}25\%$ ) до 38,3 % (для торфа с  $R = 5\%$ ) органических веществ сырья, в то время как исходное сырье содержит лишь 3,8–9,2 % водорастворимых соединений. Увеличение выхода водорастворимых соединений при высоких температурах и избыточном давлении происходит за счет деструкции легкогидролизуемых полисахаридов, гидролиза соединений других классов и обогащения продуктов гидролиза такими соединениями, как органические кислоты, олигосахариды, пектинны, уроновые кислоты, аминокислоты и др.

Выход водорастворимых веществ для мха и магелланикум-торфа со степенью разложения 5 % в этих условиях очень близок, хотя исходный мох богаче соединениями углеводного характера. Практически одинаковый выход водорастворимых соединений в этом случае можно объяснить различиями в морфологической структуре растительных клеток мха и малоразложившегося торфа. В отсутствие сильных гидролизующих агентов растительная ткань мха более устойчива к деструкции, чем торф, частично подвергнутый разложению в природных условиях. По-видимому, водорастворимые соединения мха в большей степени представлены олигосахаридами, что подтверждается увеличением количества редуцирующих веществ после инверсии.

С ростом степени гумификации выход водорастворимых соединений и редуцирующих веществ в их составе заметно снижается. Увеличение количества редуцирующих веществ после инверсии и в этом случае подтверждает, что значительная часть углеводов представлена полисахаридами (олигосахаридами, пектинами).

Установлена продолжительность бескислотного гидролиза (табл. 5).

**Таблица 5. Влияние продолжительности процесса на выход водорастворимых и редуцирующих веществ магелланикум-мха и магелланикум-торфа**

**Table 5. Effect of process duration on the yield of water-soluble and reducing substances of magellanicum moss and magellanicum peat**

Вид сырья	Продолжительность процесса, ч		
	1	2	3
<i>Выход органических веществ, %</i>			
Магелланикум-мох	5,9	24,2	38,0
Магелланикум-торф, 5 %	7,6	27,2	38,3
Магелланикум-торф, 10–15 %	5,3	22,6	32,1
Магелланикум-торф, 20–25 %	4,3	20,3	28,1
<i>Выход редуцирующих веществ, %</i>			
Магелланикум-мох:			
до инверсии	1,0	10,3	14,0
после инверсии	2,1	14,5	19,1
Магелланикум-торф, 5 %:			
до инверсии	3,2	12,5	20,3
после инверсии	5,3	14,6	23,6
Магелланикум-торф, 10–15 %:			
до инверсии	2,9	10,5	16,1
после инверсии	4,5	12,4	18,3
Магелланикум-торф, 20–25 %:			
до инверсии	2,0	10,4	13,1
после инверсии	3,8	12,0	16,6

Оптимальной продолжительностью процесса гидролиза для всех видов сырья является трехчасовой гидролиз. При меньшей продолжительности процесса выход водорастворимых веществ значительно ниже, а увеличение времени гидролиза свыше 3 ч нецелесообразно по экономическим соображениям.

Выход водорастворимых соединений оказался наибольшим для магелланикум-мха и магелланикум-торфа малой степени разложения (5 %) и составил порядка 38 % от органической массы исходного сырья.

Таким образом, установлены оптимальные параметры проведения водного гидролиза и выбраны два образца наиболее перспективного сырья для получения препаратов биоцидного действия по данному методу – магелланикум-мох и магелланикум-торф со степенью разложения 5 %.

Представляло интерес испытать биоцидную активность препаратов гуминовой и меланоидиновой природы. Препарат гуминовой природы целесообразно было наработать на основе магелланикум-торфа со степенью разложения 20–25 %, а меланоидиновой природы – на основе магелланикум-мха, наиболее богатого углеводными компонентами.

Установлено влияние технологических параметров окислительной деструкции торфа и мха на выход и состав продуктов окисления.

Существенным фактором, определяющим эффективность процесса получения и свойства препарата, является щелочная агент, а также его количество, использованное в процессе. Щелочь извлекает гуминовые вещества из торфа в виде водорастворимых солей и связывает образующиеся карбоновые кислоты, предотвращая возможность их дальнейшего окисления и способствуя целенаправленному превращению органических соединений торфа в карбоновые кислоты. Количество гидроксида должно быть достаточным для связывания всех образующихся кислых продуктов реакции. При этом в опытах использовали три типа щелочных агентов – гидроксид натрия, гидроксид аммония и их смесь в соотношении 1 : 1.

Установлено, что для всех вариантов опытов повышение содержания щелочи в реакционной среде в исследуемом диапазоне сопровождается увеличением выхода препарата (табл. 6).

**Таблица 6. Влияние вида щелочного агента и его расхода на выход препаратов**

**Table 6. Effect of type of alkalizing agent and its consumption on the yield of preparations**

Вид щелочи	Расход щелочи, % на органическую массу сырья	Выход препарата, % на органическую массу сырья				
		Мох-магелланикум				
		<i>R</i> = 5 %	<i>R</i> = 10–15 %	<i>R</i> = 20–25 %		
NaOH	20	30,3	35,6	45,4	54,1	
	30	38,6	39,5	47,1	60,2	
	40	47,8	52,9	68,5	74,1	
	50	51,0	53,3	68,6	76,5	
	60	51,0	53,8	68,5	76,0	
NaOH + NH <sub>4</sub> OH 1 : 1	20	25,3	34,8	44,3	51,6	
	30	36,7	40,3	56,9	58,7	
	40	43,7	50,4	59,0	72,9	
	50	48,5	51,3	59,4	72,1	
	60	49,0	51,5	59,0	72,5	
NH <sub>4</sub> OH	20	14,8	24,7	35,0	47,3	
	30	32,5	33,0	43,5	48,4	
	40	36,1	37,5	46,7	54,8	
	50	36,7	43,5	47,1	54,8	
	60	37,0	43,3	47,5	54,3	

Наибольший выход препаратов из мха (47,8–51,0 %) и из взятых образцов торфа разной степени разложения (52,7–72,9 %) наблюдался при применении самого сильного щелочного агента гидроксида натрия с расходом 40–50 % на органическую массу сырья. Применение смеси гидроксидов аммония и натрия понижает выход органических веществ на 3–9 %, но оптимальный расходом смеси щелочных агентов можно считать также 40–50 % от органического вещества сырья. При использовании гидроксида аммония переход органических веществ в раствор самый низкий, хотя оптимальный диапазон его расхода лежит в тех же пределах.

На основании полученных данных можно заключить, что для получения препаратов с удовлетворительным выходом расход щелочного агента должен быть не менее 40 % от органической массы сырья, так как при более низких концентрациях выход препарата недостаточен. Увеличение расхода щелочи свыше 40 % также нецелесообразно, поскольку практически не сказывается на его выходе, но увеличивает щелочность препарата.

Влияние расхода окислителя – пероксида водорода, и продолжительности процесса приведено в табл. 7.

Установлено, что для получения препарата с максимальным выходом органических веществ можно ограничиться расходом пероксида водорода 15–20 % на органическую массу сырья, так как с дальнейшим повышением его концентрации снижается выход щелочерастворимых продуктов, очевидно, за счет распада до CO<sub>2</sub> легкоокисляющихся компонентов. При меньшем расходе окислителя выход препарата недостаточен.

**Таблица 7. Влияние продолжительности окисления и расхода окислителя на выход препаратов****Table 7. Effect of oxidation duration and oxidant consumption on drug yields**

Продолжительность, ч	Расход пероксида водорода, % на органическую массу сырья	Выход препарата, % на органическую массу сырья				
		Магелланикум-мох		Магелланикум-торф		
		R = 5 %	R = 10–15%			
1,0	10,0	25,6	30,0	40,8	45,3	
	15,0	27,0	33,2	41,2	47,4	
	20,0	31,9	36,1	45,7	51,2	
	25,0	29,3	34,7	40,7	48,9	
2,0	10,0	28,0	33,4	49,7	60,5	
	15,0	33,1	37,0	55,8	62,4	
	20,0	37,9	42,7	57,2	64,3	
	25,0	35,6	41,5	59,0	62,0	
3,0	10,0	34,5	40,7	54,4	62,7	
	15,0	36,4	51,3	60,3	65,1	
	20,0	36,7	51,9	63,5	67,4	
	25,0	34,2	48,3	55,5	61,1	
4,0	10,0	35,4	42,3	50,8	56,4	
	15,0	37,0	47,1	48,3	60,0	
	20,0	37,4	47,0	48,1	61,0	
	25,0	35,2	42,6	44,5	56,3	

В большой степени выход продуктов окисления и их состав определяет температурный режим процесса. Повышение температуры окисления приводит к увеличению глубины деструкции соединений торфа и росту выхода низкомолекулярных продуктов, в том числе карбоновых кислот (табл. 8).

**Таблица 8. Влияние температуры окисления на выход препаратов****Table 8. Effect of oxidation temperature on drug yield**

Температура, °C	Выход препарата, % на органическую массу сырья				
	Магелланикум-мох	Магелланикум-торф			
		R = 5 %	R = 10–15%		
100	31,2	39,1	45,9	50,8	
110	35,8	47,9	61,5	65,3	
120	38,2	52,2	68,3	71,2	
130	40,3	55,1	70,1	72,6	
140	42,6	57,3	71,3	72,8	

Результаты экспериментов показали, что в исследуемом диапазоне температур выход щелоче-растворимых продуктов окисления с ростом температуры от 100 до 140 °C для магелланикум-мха увеличивался с 31,2 до 42,2 %, малоразложившегося магелланикум-торфа – с 39,1 до 57,3, для более разложившихся торфов – с 45,9–50,8 до 71,3–72,8 %. Максимальный выход препаратов достигается при температуре 120–140 °C. С экономической точки зрения выгоднее использовать температуру 120 °C. Однако для того, чтобы выяснить влияние температурного параметра на биоцидную активность продуктов окисления, целесообразно получить ряд препаратов при более высокой температуре. За температурный режим получения препарата можно принять диапазон температур 120–140 °C, который обеспечивает наиболее полное извлечение его биологически активных компонентов.

Образцы препаратов для изучения биоцидной активности получены при следующих условиях: температура процесса – 120–140 °C; продолжительность окисления – 3 ч; расход щелочного агента – 40 %, пероксида водорода – 15–20 % от органической массы сырья. В качестве щелочного агента использовали гидроксид аммония и его смесь с гидроксидом натрия, поскольку гидроксид аммония и аммонийные соли могут усиливать биоцидные свойства препаратов.

С применением методов окисления в установленных условиях было наработано девять препаратов из разного исходного сырья и с использованием различных щелочных агентов. Образцы № 1 и 2 получены при окислении магелланикум-мха в среде гидроксида аммония и смеси гидроксидов аммония и натрия (1 : 1) соответственно. Образцы № 3 и 4 – этими же способами из магелланикум-торфа со степенью разложения 5 %; образцы № 5 и 6 – из магелланикум-торфа со степенью разложения 10–15 %; образцы № 7 и 8 – из магелланикум-торфа со степенью разложения 20–25 %. Образец № 9

наработан из наиболее разложившегося торфа ( $R = 20\text{--}25\%$ ) с использованием смеси гидроксидов аммония и натрия и катализатора окисления – соли кобальта. Еще два препарата – из магелланикум-мха (образец № 10) и магелланикум-торфа со степенью разложения 5 % (образец № 11) – наработаны методом бескислотного водного гидролиза.

Из образцов, полученных с использованием гидроксида аммония, методом испарения удален аммиак, водные гидролизаты переданы в исходном виде.

Исследованы физико-химические свойства полученных образцов препаратов (табл. 9).

**Таблица 9. Физико-химические свойства препаратов**

**Table 9. Physicochemical properties of preparations**

Номер образца	Цвет	Массовая доля веществ, %			рН
		органических	сухих	зольных	
1	Желтый	3,74	3,80	0,06	8,1
2	Желтовато-коричневый	4,22	4,40	0,18	8,8
3	Светло-коричневый	3,87	3,95	0,08	8,1
4	Светло-коричневый	4,76	4,96	0,20	9,0
5	Светло-коричневый	6,18	6,43	0,25	9,2
6	Коричневый	6,81	6,94	0,13	7,9
7	Темно-коричневый	7,32	7,50	0,18	8,2
8	Темно-коричневый	7,35	7,65	0,30	9,4
9	Темно-коричневый	7,99	8,31	0,32	9,6
10	Желтовато-коричневый	1,23	1,24	0,01	4,0
11	Светло-коричневый	1,56	1,57	0,01	3,4

Препараты, полученные из мха и торфа, – это однородные непрозрачные жидкости от желтого до темно-коричневого цвета, хорошо растворимые в воде. Массовая доля органических, сухих и зольных веществ в препаратах значительно отличается в зависимости от исходного сырья, способа получения и используемых реагентов. Препарат, полученный из мха методом бескислотного высокотемпературного гидролиза (образец № 10), имел наименьшую концентрацию органических веществ – 1,23 %, причем практически все сухие вещества представлены органическими соединениями. Для образца № 11, полученного этим же способом из магелланикум-торфа малой степени разложения (5 %), содержание в растворе органических и сухих веществ также было практически одинаковым и составляло 1,56 и 1,57 %.

Для образцов № 1 и 2, полученных окислением магелланикум-мха в среде гидроксида аммония и в смеси гидроксида аммония и гидроксида натрия 1 : 1 соответственно, содержание органических веществ после удаления аммиака составляло 3,74 и 4,22 %, а сухих веществ – 3,80 и 4,40 % соответственно. Аналогичные показатели для образцов № 2 и 3, наработанных из торфа с низкой степенью разложения (5 %), отличались незначительно и составляли 3,87 и 4,76 %. В препаратах, полученных из торфа с более высокой степенью разложения, суммарное содержание органических веществ было существенно выше и составляло от 6,18 до 7,32 % для образцов, полученных в среде гидроксида аммония (образцы № 5 и 7), до 6,81–7,35 % для образцов № 6 и 8, полученных с использованием смеси гидроксидов аммония и натрия. Максимальной массовой долей органических и сухих веществ характеризовался образец № 9, полученный с применением катализатора окисления – 7,99 и 8,31 % соответственно. Препараты, полученные методом окисления, имели щелочную реакцию среды (рН 7,9–9,6), а полученные методом бескислотного гидролиза – кислую реакцию среды (рН 3,4–4,0).

Специалистами Института микробиологии НАН Беларуси проведены исследования антимикробной активности гидролизатов и оксидатов в отношении пяти грибных (*A. niger* БИМ F-544, *B. cinerea* БИМ F-551, *F. oxysporum* 381, *Alt. alternata* БИМ F-568 и *Alternaria* sp. F4) и пяти бактериальных (*C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. Amylovora* E2, *P. carotovorum* 25.1) фитопатогенов, которые способны вызывать ряд заболеваний сельскохозяйственных культур.

Оценка антимикробных свойств выявила наличие высокой активности в отношении фитопатогенных бактерий у пяти образцов (№ 3, 7, 9, 10, 11) из одиннадцати переданных на испытания (табл. 10).

Наиболее высокой антибактериальной активностью обладали три препарата, полученные методом окисления в среде гидроксида аммония из магелланикум-торфа со степенью разложения 5 % (образец № 3) и 20–25 % (образец № 7) и окислением магелланикум-торфа (20–25 %) в среде гидроксидов аммония и натрия с использованием катализатора окисления – солей кобальта (образец № 9). Эти препараты проявили активность в отношении фитопатогена *C. michiganensis* Н.П.

**Таблица 10. Результаты определения antimикробных свойств образцов, полученных из сфагнового мха и сфагнового торфа****Table 10. Results of antimicrobial properties of samples obtained from sphagnum moss and sphagnum peat**

Номер образца	Микроорганизм		
	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i> DC3000	<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i> Н.П.	<i>Erwinia amylovora</i> E2
3	—	+	—
7	—	+	—
9	—	+	—
10	±	±	—
11	±	±	±

П р и м е ч а н и е: «—» – признак отсутствует или выражен крайне слабо; «+» – зона задержки роста есть, границы четкие; «±» – зона задержки роста есть, границы расплывчатые.

Выявлен наиболее активный образец, который подавлял самый широкий круг фитопатогенов – бескислотный водный гидролизат магелланикум-торфа с  $R = 5\%$  (образец № 11). Этот препарат активен в отношении трех фитопатогенов – *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *C. michiganensis* Н.П. и *Erwinia amylovora* E2. Для образца № 10, полученного тем же способом из магелланикум-мха, была зафиксирована активность в отношении двух фитопатогенных бактерий – *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 и *C. michiganensis* Н.П. Антифунгального действия ни один препарат не проявил.

**Заключение.** Для получения препаратов, обладающих биоцидной активностью, выбран сфагнум магелланикум-торф разной степени разложения (5; 10–15 и 20–25 %) и растение-торфообразователь – магелланикум-мох. Для их наработки применены методы окисления и высокотемпературного гидролиза в водной среде. Установлены условия проведения процессов окисления и гидролиза по критерию максимального выхода растворимых веществ.

Гидролиз магелланикум-мха и магелланикум-торфа малой степени разложения (5 %) проводили при температуре 160 °C в течение 3 ч, окисление – при температуре 140 °C в течение 3 ч; с расходом щелочи 40 %, пероксида водорода – 15–20 % от органической массы сырья. В качестве щелочного агента использовали гидроксид аммония и его смесь с гидроксидом натрия. Окисленные препараты получены для всех видов торфяного сырья и мха. Наработано 11 препаратов, из которых 9 – методом окисления, а 2 – методом гидролиза, определены их физико-химические свойства. Специалистами Института микробиологии НАН Беларусь с использованием модифицированного метода отсроченного antagonизма изучена биоцидная активность препаратов в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов бактериальной и грибной природы: *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. amylovora* E2, *P. carotovorum* 25.1, *A. niger* БИМ F-544, *B. cinerea* БИМ F 551, *F. oxysporum* 381, *Alt. alternata* БИМ F-568 и *Alternaria* sp. F4, способных вызывать заболевания растений.

Показано, что наиболее высокой антибактериальной активностью в отношении бактериального патогена (вызывает бактериозы растений томата) *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. обладали три препарата, полученные методом окисления магелланикум-торфа со степенью разложения 5 % (образец № 3) и 20–25 % (образец № 7) в среде гидроксида аммония, а также образец № 11, полученный окислением того же торфа (20–25 %) в среде гидроксидов аммония и натрия в соотношении 1 : 1 с использованием катализатора окисления – солей кобальта.

Образец № 11, полученный методом высокотемпературного водного гидролиза из магелланикум-торфа со степенью разложения 5 %, подавлял наиболее широкий круг фитопатогенов. Он активен в отношении возбудителей бактериозов растений томата (*C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. и *P. syringae* pv. *tomato* DC3000) и плодовых культур (*E. amylovora* E2). Для образца № 10, полученного тем же способом из магелланикум-мха, была зафиксирована активность против двух фитопатогенов – *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 и *C. michiganensis* Н.П. Для остальных образцов antimикробная активность в отношении изученного ряда фитопатогенов отсутствовала.

Препараты, полученные из природного сырья и обладающие активностью в отношении фитопатогенных микроорганизмов, могут быть использованы при разработке средств защиты растений нового поколения.

### Список использованных источников

1. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларусская наука, 2009. – С. 56–141.
2. Биологически активные соединения различных видов сфагнового торфа / Г. В. Наумова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2015. – № 3. – С. 8–13.
3. Бабешина, Л. Г. Сфагновые мхи Западно-Сибирской равнины: морфология, анатомия, экология и применение в медицине : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Л. Г. Бабешина. – Томск, 2011. – 42 с.
4. Дмитрук, В. Н. Сравнительное фармакогностическое исследование рода *Sphagnum* и перспективы их использования : автореф. дис. ... канд. фарм. наук / В. Н. Дмитрук. – Самара, 2008. – 22 с.
5. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск, 1975. – 318 с.
6. Дамберг, Б. Э. Реакция меланоидинообразования и ее биологическое значение / Б. Э. Дамберг // Известия АН Латвийской ССР. – 1986. – № 1. – С. 12–21.
7. Bertani, G. Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic *Escherichia coli* / G. Bertani // J. Bacteriol. – 1951. – Vol. 62, № 3. – P. 293–300.
8. Wongjirathiti, A. Utilisation of local crops as alternative media for fungal growth / A. Wongjirathiti, S. Yottakot // Pertanika J. Trop. Agric. Sci. – 2017. – Vol. 40. – P. 295–304.
9. Лысак, В. В. Микробиология : методические рекомендации к лабораторным занятиям, контроль самостоятельной работы студентов / В. В. Лысак, Р. А. Желдакова. – Минск : БГУ, 2002. – 100 с.

### References

1. Tomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and the products of its proceeding]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2009, pp. 56–141. (in Russian)
2. Naumova G. V., Thomson A. E., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F. *Biologicheski aktivnye soedineniya razlichnyh vidov sfagnovogo torfa* [Biologically active compounds of various kinds of sphagnum peat]. *Himiya tverdogo topiliva = Chemistry of Solid Fuels*, 2015, no. 3, pp. 8–13. (in Russian)
3. Babeshina L. G. *Sfagnovye mhi Zapadno-Sibirskoj ravniny: morfologiya, anatomiya, ekologiya i primenenie v mediciine* [Sphagnum mosses of West Siberian plain: morphology, anatomy, ecology and application in medicine. Dr. biol. sci. abs. diss.]. Tomsk, 2011, 42 p. (in Russian)
4. Dmitruk V. N. *Sravnitel'noe farmakognosticheskoe issledovanie roda Sphagnum i perspektivy ih ispol'zovaniya* [Comparative pharmacognostic study of the genus Sphagnum and prospects for their use. PhD farm. sci. abs. diss.]. Samara, 2008, 22 p. (in Russian)
5. Lishtvan I. I., Korol' N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods of their determination]. Minsk, 1975, 318 p. (in Russian)
6. Damberg B. E. *Reaktsiya melanoidinoobrazovaniya i ee biologicheskoe znachenie* [The melanoidin formation reaction and its biological significance]. *Izvestiya AN Latviyskoy SSR = Proceedings of the Academy of Sci. of the Latvian SSR*, 1986, no. 1, pp. 12–21. (in Russian)
7. Bertani G. Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.*, 1951, vol. 62, no. 3, pp. 293–300.
8. Wongjirathiti A., Yottakot S. Utilisation of local crops as alternative media for fungal growth. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.*, 2017, vol. 40, pp. 295–304.
9. Lysak V. V., Zheldakova R. A. *Mikrobiologiya: metodicheskie rekomendacii k laboratornym zanyatiyam, kontrol samostoyatel'noj raboty studentov* [Microbiology: methodological recommendations for laboratory classes, control of students' independent work]. Minsk, 2002, 100 p. (in Russian)

### Информация об авторах

**Жмакова Надежда Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (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 Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

### Information about the authors

**Nadezhda A. Zhmakova** – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

**Natalya L. Makarova** – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Семенчукова Екатерина Александровна – научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларусь (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г Минск, Беларусь). E-mail: eka2105@mail.ru*

*Муратова Анна Алексеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларусь (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г Минск, Беларусь). E-mail: anya.muratova.93@mail.ru*

*Katsiaryna A. Semenchukova – Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: eka2105@mail.ru*

*Anna A. Muratova – Ph. D. (Biological), Senior Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: anya.muratova.93@mail.ru*

## ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫРАБОТАННОГО ТОРФЯНИКА ВЕРХОВОГО ТИПА ПОД ПОСАДКАМИ ВИРГИНИЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ КЛЮКВЫ КРУПНОПЛОДНОЙ В БЕЛАРУСИ

**Ж. А. Рупасова<sup>1</sup>, А. П. Яковлев<sup>1</sup>, Э. И. Коломиец<sup>2</sup>, З. М. Алещенкова<sup>3</sup>, Л. Е. Картыжова<sup>3</sup>,  
С. П. Зимич<sup>1</sup>, М. Н. Вашкевич<sup>1</sup>, С. Н. Авраменко<sup>1</sup>, А. А. Лешков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Центральный ботанический сад НАН Беларусь, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Государственное научно-производственное объединение

«Химический синтез и биотехнологии НАН Беларусь», Минск, Беларусь;

<sup>3</sup>Институт микробиологии НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Приведены результаты сравнительного исследования в 2020 и 2021 г. в Смолевичском районе Минской области и в более северном Докшицком районе Витебской области в опытной культуре на рекультивируемых участках торфяной выработки верхового типа влияния минерального Basacot Plus 6 ( $N_{15}P_8K_{12}$  кг/га д. в.) и отечественных биологических удобрений – азотфикссирующего и фосфатомобилизующего микробного MaKloR в 5%-ной и 10%-ной концентрациях, а также органо-минерального Экогум-комплекса на агрохимические свойства субстрата под посадками раннеспелого Ben Lear и позднеспелого Stevens сортов клюквы крупноплодной в рамках идентичных полевых экспериментов. Установлено, что в оба сезона все испытуемые агроприемы способствовали его заметному обогащению питательными элементами по сравнению с контролем, тогда как степень данного обогащения определялась географическим положением района исследований, погодными условиями вегетационного периода, генотипом опытных растений и стадией их сезонного развития. Тем не менее, независимо от всех обозначенных факторов, в большинстве случаев наиболее результативным в повышении уровня плодородия субстрата следовало признать внесение минерального удобрения, а среди биологических удобрений – использование Экогум-комплекса и 5%-ного MaKloRa.

**Ключевые слова:** выработанный торфяник; клюква крупноплодная; сорта; минеральные и микробные удобрения; агрохимические свойства; питательные элементы; легкогидролизуемый азот; подвижный фосфор; обменный калий.

**Для цитирования.** Рупасова Ж. А., Яковлев А. П., Коломиец Э. И., Алещенкова З. М., Картыжова Л. Е., Зимич С. П., Вашкевич М. Н., Авраменко С. Н., Лешков А. А. Влияние удобрений на агрохимические свойства выработанного торфяника верхового типа под посадками виргинильных растений клюквы крупноплодной в Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 159–173.

## INFLUENCE OF FERTILIZERS ON AGROCHEMICAL PROPERTIES OF PRODUCED UP-MOOR PEAT LAND UNDER LARGE-FRUIT CRANBERRY VIRGINIL PLANTS IN BELARUS

**J. A. Rupasova<sup>1</sup>, A. P. Yakovlev<sup>1</sup>, E. I. Kolomiets<sup>2</sup>, Z. M. Aleshchenkova<sup>3</sup>, L. E. Kartyzhova<sup>3</sup>,  
S. P. Zimich<sup>1</sup>, M. N. Vashkevich<sup>1</sup>, S. N. Avramenko<sup>1</sup>, A. A. Leshkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>State Scientific and Production Association "Chemical Synthesis and Biotechnology  
of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, Belarus;

<sup>3</sup>Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Abstract.** The article presents the results of a comparative study in 2020 and 2021 in the Smolevichi district of the Minsk region and in the more northern Dokshitsy district of the Vitebsk region, geographically 250 km from each other, in an experimental culture on reclaimed areas of high-moor peat production of the effect of mineral Basacot Plus 6 ( $N_{15}P_8K_{12}$  kg/ha active ingredient) and domestic biological fertilizers – nitrogen-fixing and phosphate-mobilizing microbial MaKloR in 5 % and 10 % concentrations, as well as organo-mineral Ecogum-complex on the agrochemical properties of the substrate under plantings of early-ripening Ben Lear and late-ripening Stevens varieties of large-fruited cranberry

within the framework of identical field experiments. It was established that in both seasons all the tested agricultural practices contributed to its noticeable enrichment with nutrients compared to the control, while the degree of this enrichment was determined by the geographical location of the study area, weather conditions of the growing season, the genotype of the experimental plants and the stage of their seasonal development. Nevertheless, regardless of all the indicated factors, in most cases the most effective in increasing the level of substrate fertility was the introduction of mineral fertilizers, and among biological fertilizers – the use of Ecogum-complex and 5 % MaKloR.

**Keywords:** developed peatland; large-fruited cranberry; varieties; mineral and microbial fertilizers; agrochemical properties; nutrients, easily hydrolyzed nitrogen; mobile phosphorus; exchangeable potassium.

**For citation.** Rupasova J. A., Yakovlev A. P., Kolomiets E. I., Aleshchenkova Z. M., Kartyzhova L. E., Zimich S. P., Vashkevich M. N., Avramenko S. N., Leshkov A. A. Influence of fertilizers on agrochemical properties of produced up-moor peat land under large-fruit cranberry virginil plants in Belarus. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 159–173.

**Введение.** В связи с разработкой технологии фиторекультивации выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений верхового типа на основе создания локальных агроценозов интродуцированных сортов клюквы крупноплодной особого внимания заслуживают вопросы оптимизации минерального питания данной культуры. Для их решения представлялось необходимым дать комплексную оценку влияния на агрохимические свойства субстрата не только традиционно применяемого при ее возделывании полного минерального удобрения Basacot Plus 6 ( $N_{15}P_8K_{12}$  кг/га д. в.), но и экологически безопасных биологических удобрений, разработанных в УП «Белуниверсалпродукт» (Республика Беларусь) и Институте микробиологии НАН Беларусь новых препаратов – органического (Экогум-комплекс) и бактериального (МаКлоР), соответствующих биологической природе данного интродуцента.

Их применение, на наш взгляд, является особо актуальным в связи с принятым в Беларуси в 2018 г. Законом об органическом земледелии, существенно ужесточающим требования к качеству экологически чистой растениеводческой продукции, при производстве которой ограничено использование любых химических средств, в том числе минеральных удобрений. В этой связи в 2020–2021 гг. в рамках полевых экспериментов на рекультивируемых участках выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений верхового типа – «Радемье-Зеленоборское» в Смолевичском районе Минской области и «Рамжино-Журавлевское» в удаленном на 250 км к северу Докшицком районе Витебской области в рамках однотипных полевых экспериментов с применением вышеуказанных удобрений выполнены сравнительные исследования агрохимических свойств корнеобитаемой зоны торфяного субстрата в корнеобитаемой зоне виргинильных растений раннеспелого Ben Lear и позднеспелого Stevens сортов клюквы крупноплодной.

**Материалы и методы исследования.** Годы исследований характеризовались заметными различиями погодных условий вегетационного периода. Так, в 2020 г. он отнесен в основном близкими к средней климатической норме или несколько уступавшими ей температурными показателями при наиболее теплом июне, в котором в обоих районах исследований наблюдалось превышение средних многолетних значений на 21–36 %. При этом данный сезон характеризовался весьма неравномерным выпадением осадков, обусловившим в Смолевичском районе дефицит влаги в пределах 5–77 % в апреле, мае, июле и сентябре при ее избытке на 14–68 % в июне и августе. В Докшицком районе практически на всем протяжении вегетационного периода наблюдался острый дефицит влаги с отставанием количества выпавших осадков от средней многолетней нормы на 28–47 %, и лишь в мае оно превысило ее на 12 %. В обоих районах исследований два первых летних месяца вегетационного сезона 2021 г. характеризовались весьма жаркой погодой с превышением на 22–43 % средних многолетних температурных показателей, что наиболее выразительно проявилось в Докшицком районе и сопровождалось существенным дефицитом влаги, особенно в июле. Температурный режим в остальные месяцы оставался близким к средним многолетним значениям при избыточном выпадении осадков, вдвое превышавшим норму в мае и превосходившим ее на 10–64 % в остальной период при наибольших контрастах опять-таки в северном районе.

В обоих районах исследования выполнены в рамках однотипных полевых экспериментов с пятивариантной схемой: 1 – контроль, без внесения удобрений; 2 – припосадочное (в мае) луночное внесение минерального удобрения Basacot Plus 6 ( $N_{15}P_8K_{12}$  кг/га д. в.) из расчета 1,5 г под растение; 3 – некорневая обработка вегетирующих растений раствором удобрения Экогум-комплекс в концентрации 15 мл на 3 л воды из расчета 75 мл на растение; 4 – припосадочное (в мае) луночное внесение 5%-ного раствора препарата МаКлоР из расчета 0,2 л под растение; 5 – припосадочное (в мае) луночное внесение 10%-ного раствора препарата МаКлоР из расчета 0,2 л под растение. Повторность опытов трехкратная, в каждом варианте высажено по 15 растений каждого сорта клюквы крупноплодной.

Исследование агрохимических свойств торфяного субстрата в полевых экспериментах осуществляли трижды за сезон с определением содержания аммиачного азота – по ГОСТ 27894.3-88 [5]; нитратного азота – по ГОСТ 27894.4-88 [6]; подвижных форм фосфора (в пересчете на  $P_2O_5$ ) – фотоэлектроколориметрическим методом по ГОСТ 27894.5-88 [7]; обменного калия (в пересчете на  $K_2O$ ) –

методом пламенной фотометрии по ГОСТ 27894.6-88 [8]. Все аналитические определения выполнены в трехкратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel.

**Результаты и их обсуждение.** Несмотря на незначительные потребности клюквы крупноплодной, как и всех представителей семейства Ericaceae, в элементах минерального питания особо важное значение для ее успешного культивирования на выработанных торфяниках обретает система внесения удобрений, специфический характер которой определяется происхождением, ботаническим составом и индивидуальными свойствами торфяной залежи. Для корнеобитаемого слоя торфяников верхового типа характерны чрезвычайно низкие запасы доступных форм основных питательных элементов, недостаточные для ежегодного получения высококачественного урожая ягодной продукции.

Общеизвестно, что в торфяном субстрате фосфор находится в прочно связанном состоянии в виде органических соединений и без применения специальных агротехнических приемов недоступен для растений [4]. Крайне незначительны в нем и природные запасы калия, которые даже не учитываются при определении доз калийных удобрений, и поскольку данный элемент в большинстве случаев полностью расходуется уже в первый год их внесения, данные удобрения применяются ежегодно, исходя из физиологических потребностей этой культуры [2, 3]. Впервые вспаханный остаточный слой донного торфа, как правило, характеризуется также полным отсутствием доступных форм важнейшего питательного элемента – азота, находящегося в прочно связанном состоянии, причем процесс его вы свобождения из органических соединений чрезвычайно затруднен из-за низких темпов минерализации данного вида субстрата, что предопределяет необходимость внесения на этих бесплодных землях не только фосфорных и калийных, но и азотных удобрений [1].

Исследование влияния испытываемых видов удобрений на агрохимические свойства корнеобитаемой зоны остаточного слоя торфяной залежи показало, что в оба сезона в обоих районах все испытываемые агроприемы способствовали ее заметному обогащению основными питательными элементами (табл. 1, 2). При этом, независимо от района исследований и сортовой принадлежности опытных растений, наиболее высокими параметрами накопления характеризовалась самая активная аммонийная форма легкогидролизуемого азота, тогда как количественное содержание его нитратной формы уступало ей в несколько десятков раз. Заметим, что примерно сопоставимое друг с другом содержание в субстрате подвижных соединений фосфора и обменного калия было в несколько раз ниже такового легкогидролизуемого азота.

**Таблица 1. Агрохимические характеристики верхнего корнеобитаемого слоя торфяного субстрата (0–25 см) под посадками виргинильной клюквы крупноплодной в Смолевичском районе в годы исследований**

**Table 1. Agrochemical characteristics of the upper root layer of peat substrate (0–25 cm) under large-fruited virgin cranberry plantings in the Smolevichi district during the research years**

Сорт	Вариант опыта	рН <sub>KCl</sub>	N–NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N–NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		
			мг/кг сухого вещества					
<b>2020 г.</b>								
<i>Май</i>								
Ben Lear	1	2,72	301,5 ± 3,1	5,5 ± 0,1	55,3 ± 0,5	80,7 ± 0,6		
	2	2,70	288,8 ± 1,3	6,4 ± 0,1	95,7 ± 1,2	200,9 ± 0,9		
	3	2,64	310,6 ± 3,0	2,9 ± 0,1	64,1 ± 0,8	145,8 ± 1,2		
	4	2,68	254,1 ± 2,1	8,5 ± 0,1	65,8 ± 0,8	95,5 ± 0,9		
	5	2,76	194,0 ± 1,3	3,0 ± 0,1	76,4 ± 0,8	143,1 ± 0,9		
Stevens	1	2,65	223,2 ± 2,3	2,7 ± 0,1	57,0 ± 0,6	70,5 ± 0,6		
	2	2,62	339,8 ± 3,3	2,6 ± 0,1	60,6 ± 0,9	119,3 ± 1,2		
	3	2,65	130,3 ± 1,3	5,7 ± 0,1	62,3 ± 0,6	82,5 ± 1,2		
	4	2,70	389,0 ± 4,0	2,4 ± 0,1	56,2 ± 0,4	120,2 ± 0,9		
	5	2,73	305,2 ± 3,0	2,5 ± 0,1	51,8 ± 0,5	190,6 ± 0,9		
<i>Июль</i>								
Ben Lear	1	2,87	700,5 ± 6,9	3,1 ± 0,1	43,0 ± 1,2	60,5 ± 0,9		
	2	2,68	817,1 ± 8,3	2,1 ± 0,1	71,1 ± 0,8	133,7 ± 0,6		
	3	2,61	469,1 ± 5,0	1,9 ± 0,1	46,5 ± 0,5	77,1 ± 0,6		
	4	2,88	571,1 ± 6,1	3,9 ± 0,1	76,4 ± 0,9	91,6 ± 0,6		
	5	2,81	414,5 ± 3,5	2,2 ± 0,1	50,0 ± 0,4	87,6 ± 0,9		
Stevens	1	2,89	445,4 ± 4,0	2,5 ± 0,1	39,5 ± 0,5	66,0 ± 0,3		
	2	2,83	542,0 ± 5,1	5,5 ± 0,1	79,9 ± 0,9	161,4 ± 0,6		
	3	2,76	559,3 ± 5,3	9,0 ± 0,1	43,0 ± 0,4	84,3 ± 0,6		
	4	2,81	190,4 ± 1,6	11,4 ± 0,1	37,7 ± 0,5	36,4 ± 0,3		

Сорт	Вариант опыта	рН <sub>KCl</sub>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
			мг/кг сухого вещества				
			5	2,77	461,0 ± 4,3	3,3 ± 0,1	50,0 ± 0,7
<b>Сентябрь</b>							
Ben Lear	1	2,76	166,7 ± 1,3	7,3 ± 0,1	71,1 ± 1,0	43,4 ± 0,6	
	2	2,52	203,1 ± 2,3	5,1 ± 0,1	95,7 ± 0,9	46,4 ± 0,6	
	3	2,75	327,0 ± 3,3	4,9 ± 0,1	67,6 ± 0,8	49,7 ± 0,3	
	4	2,73	75,6 ± 0,9	9,3 ± 0,1	71,1 ± 0,7	28,6 ± 0,3	
	5	2,68	139,4 ± 1,3	8,6 ± 0,1	60,6 ± 0,7	70,8 ± 0,9	
Stevens	1	2,71	272,4 ± 3,0	3,9 ± 0,2	39,5 ± 0,5	25,9 ± 0,6	
	2	2,70	325,2 ± 3,5	40,1 ± 0,6	218,5 ± 2,8	114,7 ± 0,9	
	3	2,65	190,4 ± 1,5	3,7 ± 0,1	102,7 ± 1,0	53,6 ± 0,6	
	4	2,65	146,7 ± 1,3	8,7 ± 0,1	76,4 ± 0,8	42,2 ± 0,6	
	5	2,77	126,6 ± 3,9	4,1 ± 0,1	60,6 ± 0,7	50,3 ± 0,3	
<b>2021 г.</b>							
<b>Май</b>							
Ben Lear	1	2,74	694,1 ± 5,2	6,1 ± 0,1	50,9 ± 2,5	67,5 ± 0,6	
	2	2,66	432,7 ± 3,9	7,8 ± 0,1	74,6 ± 3,7	95,5 ± 0,9	
	3	2,68	426,3 ± 5,2	6,7 ± 0,1	57,0 ± 1,2	80,7 ± 0,6	
	4	2,66	348,9 ± 3,9	7,3 ± 0,1	52,7 ± 2,5	60,0 ± 0,3	
	5	2,67	234,1 ± 3,9	7,0 ± 0,1	56,2 ± 0,0	81,9 ± 0,6	
Stevens	1	2,95	343,4 ± 3,9	19,9 ± 0,3	80,7 ± 2,5	77,1 ± 0,6	
	2	2,87	534,7 ± 6,4	12,4 ± 0,2	97,4 ± 6,2	129,8 ± 0,9	
	3	2,98	431,8 ± 5,2	9,7 ± 0,2	63,2 ± 2,5	77,1 ± 0,6	
	4	2,93	174,0 ± 3,9	8,2 ± 0,1	55,3 ± 3,7	64,8 ± 0,3	
	5	2,76	160,3 ± 2,6	7,0 ± 0,1	67,6 ± 3,7	107,2 ± 1,2	
<b>Июль</b>							
Ben Lear	1	2,74	302,4 ± 2,6	9,2 ± 0,1	87,8 ± 2,5	38,6 ± 0,6	
	2	2,71	469,1 ± 3,9	9,9 ± 0,1	93,9 ± 1,2	59,6 ± 0,6	
	3	2,72	382,6 ± 2,6	8,8 ± 0,1	90,4 ± 1,2	46,1 ± 0,3	
	4	2,71	123,9 ± 2,6	9,5 ± 0,1	82,5 ± 2,5	34,0 ± 0,3	
	5	2,71	196,8 ± 5,2	7,2 ± 0,1	81,6 ± 1,2	49,4 ± 0,6	
Stevens	1	2,88	519,2 ± 5,2	14,8 ± 0,2	69,3 ± 1,2	63,5 ± 0,9	
	2	2,95	395,3 ± 2,6	11,9 ± 0,2	85,1 ± 1,2	136,4 ± 0,9	
	3	3,04	272,4 ± 3,9	9,5 ± 0,1	66,7 ± 2,5	80,7 ± 0,6	
	4	2,98	256,9 ± 2,6	12,2 ± 0,2	71,1 ± 1,2	59,6 ± 0,6	
	5	2,77	203,1 ± 1,3	9,7 ± 0,1	82,5 ± 2,5	107,8 ± 0,6	
<b>Сентябрь</b>							
Ben Lear	1	2,84	643,2 ± 6,6	13,6 ± 0,2	83,3 ± 1,0	44,9 ± 0,3	
	2	2,65	53,5 ± 0,7	18,2 ± 0,4	114,4 ± 1,8	60,8 ± 0,6	
	3	2,76	219,3 ± 2,9	6,4 ± 0,1	86,1 ± 1,0	68,1 ± 0,6	
	4	2,78	227,7 ± 3,0	5,5 ± 0,1	139,8 ± 1,5	70,8 ± 0,9	
	5	2,72	217,2 ± 2,2	5,6 ± 0,1	66,4 ± 0,8	71,1 ± 0,6	
Stevens	1	2,99	150,0 ± 1,9	6,2 ± 0,1	69,2 ± 0,8	31,0 ± 0,3	
	2	2,92	30,4 ± 0,1	7,0 ± 0,1	91,8 ± 1,0	40,7 ± 0,3	
	3	3,11	433,4 ± 4,4	6,5 ± 0,1	100,2 ± 1,7	50,6 ± 0,6	
	4	3,12	349,4 ± 4,5	5,7 ± 0,1	63,5 ± 0,9	30,4 ± 0,3	
	5	2,84	267,6 ± 3,0	6,3 ± 0,1	108,7 ± 1,5	53,6 ± 0,6	

**Таблица 2. Агротехнические характеристики верхнего корнеобитаемого слоя торфяного субстрата (0–25 см) под посадками виргинильной клюквы крупноплодной в Докшицком районе в годы исследований**

**Table 2. Agrochemical characteristics of the upper root layer of peat substrate (0–25 cm) under large-fruited virginal cranberry plantings in the Dokshitsy district during the research years**

Сорт	Вариант опыта	рН <sub>KCl</sub>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		
			мг/кг сухого вещества					
			5	2,77	183,1 ± 1,3	3,6 ± 0	41,2 ± 0,4	
<b>2020 г.</b>								
<b>Май</b>								
Ben Lear	1	2,72	2,74	183,1 ± 1,3	3,6 ± 0	41,2 ± 0,4		
	2	2,70	2,66	128,4 ± 1,3	3,4 ± 0	51,8 ± 0,7		
	3	2,64	2,68	164,9 ± 1,3	3,9 ± 0	44,8 ± 0,5		

Сорт	Вариант опыта	рН <sub>KCl</sub>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
			мг/кг сухого вещества			
	4	2,68	2,66	194,9 ± 2,6	2,8 ± 0	46,5 ± 0,5
	5	2,76	2,67	158,5 ± 2,6	2,7 ± 0	53,5 ± 0,7
Stevens	1	2,65	2,95	93,8 ± 1,3	7,2 ± 0,1	53,5 ± 0,6
	2	2,62	2,87	48,3 ± 1,3	7,2 ± 0,1	43,0 ± 0,5
	3	2,65	2,98	93,8 ± 1,3	10,3 ± 0,1	38,6 ± 2,5
	4	2,70	2,93	126,6 ± 1,3	9,2 ± 0,1	53,5 ± 1,2
	5	2,73	2,76	113,9 ± 1,3	7,8 ± 0,1	49,1 ± 2,5
<i>Июль</i>						
Ben Lear	1	2,74	429,0 ± 4,5	7,9 ± 0,1	57,0 ± 0,7	65,1 ± 0,6
	2	2,71	423,6 ± 4,0	7,0 ± 0,1	125,5 ± 1,2	125,6 ± 0,9
	3	2,72	427,2 ± 4,3	5,0 ± 0	67,6 ± 0,8	79,2 ± 0,3
	4	2,71	434,5 ± 4,3	11,4 ± 0,1	78,1 ± 0,8	73,5 ± 0,6
	5	2,71	394,4 ± 3,3	3,9 ± 0	75,5 ± 0,9	64,8 ± 0,3
Stevens	1	2,88	285,1 ± 3,0	32,5 ± 0,3	74,6 ± 0,8	51,2 ± 0,6
	2	2,95	166,7 ± 2,0	41,1 ± 0,3	88,6 ± 0,9	68,7 ± 0,6
	3	3,04	257,8 ± 2,3	60,6 ± 0,5	71,1 ± 0,6	62,9 ± 0,3
	4	2,98	272,4 ± 3,0	28,0 ± 0,2	65,8 ± 0,8	55,7 ± 0,9
	5	2,77	341,6 ± 3,5	8,5 ± 0,1	71,1 ± 0,9	63,8 ± 0,6
<i>Сентябрь</i>						
Ben Lear	1	2,84	390,8 ± 4,1	9,2 ± 0,1	76,4 ± 0,9	26,6 ± 0,1
	2	2,65	310,6 ± 3,3	11,5 ± 0,2	118,5 ± 1,2	61,9 ± 0,2
	3	2,76	387,1 ± 3,9	9,4 ± 0,1	88,6 ± 0,9	35,6 ± 0,1
	4	2,78	337,9 ± 3,3	17,6 ± 0,2	69,3 ± 0,5	23,7 ± 0,2
	5	2,72	427,2 ± 4,3	14,8 ± 0,1	108,0 ± 1,0	29,1 ± 0,2
Stevens	1	2,99	252,3 ± 3,0	26,9 ± 0,2	60,3 ± 0,7	23,0 ± 0,1
	2	2,92	174,0 ± 1,8	16,9 ± 0,2	113,2 ± 1,6	34,5 ± 0,1
	3	3,11	330,7 ± 3,2	35,9 ± 0,4	74,6 ± 0,8	30,9 ± 0,2
	4	3,12	312,4 ± 3,2	24,6 ± 0,1	81,6 ± 0,9	27,8 ± 0,1
	5	2,84	241,4 ± 2,5	18,0 ± 0,2	86,9 ± 1,2	35,7 ± 0,1
<i>2021 г.</i>						
<i>Май</i>						
Ben Lear	1	2,7	325,2 ± 3,9	13,6 ± 0,1	54,4 ± 2,5	338,8 ± 0,9
	2	2,6	496,4 ± 3,9	17,8 ± 0,3	88,6 ± 3,7	106,6 ± 0,6
	3	2,7	471,9 ± 2,6	11,4 ± 0,2	47,4 ± 2,5	94,9 ± 0,3
	4	2,7	481,9 ± 3,9	17,5 ± 0,2	72,0 ± 2,5	92,2 ± 0,6
	5	2,7	474,6 ± 3,9	13,2 ± 0,2	78,1 ± 3,7	105,1 ± 0,9
Stevens	1	2,9	169,4 ± 5,2	13,6 ± 0,1	52,7 ± 2,5	69,9 ± 0,6
	2	2,8	269,6 ± 5,2	9,5 ± 0,2	74,6 ± 3,7	362,3 ± 1,5
	3	3,0	489,2 ± 1,3	13,7 ± 0,3	59,7 ± 2,5	85,2 ± 0,9
	4	3,0	306,1 ± 5,2	11,3 ± 0,2	62,3 ± 3,7	77,7 ± 0,6
	5	2,7	218,6 ± 2,6	20,6 ± 0,5	49,1 ± 2,5	78,0 ± 0,9
<i>Июль</i>						
Ben Lear	1	2,7	537,4 ± 2,6	23,1 ± 0,2	57,0 ± 1,2	31,3 ± 0,6
	2	2,6	308,8 ± 3,9	28,6 ± 0,5	66,7 ± 2,5	37,9 ± 0,6
	3	2,7	502,8 ± 2,6	17,1 ± 0,3	48,3 ± 1,2	39,5 ± 0,9
	4	2,7	556,6 ± 3,9	17,2 ± 0,2	68,5 ± 2,5	32,2 ± 0,3
	5	2,8	457,3 ± 2,6	18,1 ± 0,3	70,2 ± 2,5	33,4 ± 0,3
Stevens	1	2,9	327,9 ± 2,6	18,7 ± 0,3	51,8 ± 1,2	22,6 ± 0,3
	2	3,0	317,0 ± 3,9	15,2 ± 0,3	56,2 ± 2,5	28,3 ± 0,6
	3	2,9	210,4 ± 3,9	13,6 ± 0,2	64,1 ± 1,2	36,4 ± 0,9
	4	2,9	366,2 ± 2,6	19,8 ± 0,3	60,6 ± 1,2	28,6 ± 0,3
	5	2,7	273,3 ± 2,6	27,6 ± 0,4	52,7 ± 2,5	31,9 ± 0,6
<i>Сентябрь</i>						
Ben Lear	1	2,9	166,8 ± 1,8	50,2 ± 0,8	170,8 ± 2,5	55,7 ± 0,3
	2	3,0	156,3 ± 1,4	36,3 ± 0,2	156,7 ± 1,6	64,5 ± 0,6
	3	3,1	420,8 ± 3,6	27,4 ± 0,5	170,8 ± 2,4	59,3 ± 0,3
	4	2,9	225,6 ± 3,0	29,0 ± 0,5	156,7 ± 1,8	45,8 ± 0,6
	5	2,9	131,2 ± 1,4	25,0 ± 0,4	184,9 ± 2,0	63,8 ± 0,6
Stevens	1	2,8	311,6 ± 4,0	18,6 ± 0,3	170,8 ± 1,8	65,4 ± 0,3
	2	2,7	160,5 ± 1,8	15,8 ± 0,3	204,7 ± 2,2	74,7 ± 0,6
	3	2,8	248,7 ± 2,2	15,2 ± 0,3	156,7 ± 1,9	74,4 ± 0,3
	4	2,8	189,9 ± 2,0	16,6 ± 0,3	114,4 ± 1,5	76,2 ± 0,9
	5	2,8	181,5 ± 1,9	12,9 ± 0,2	179,3 ± 2,0	73,2 ± 0,9

Наиболее объективное представление о степени обогащения корнеобитаемой зоны питательными элементами при внесении удобрений по сравнению с неудобренным агрофоном (контролем) на разных этапах сезонного развития растений дают материалы табл. 3 и 4, основанные на данных табл. 1 и 2. Их анализ позволил выявить значительные межсезонные, межвариантные и генотипические различия в пополнении запасов основных питательных элементов в торфяном субстрате. Так, в 2020 г. в Смолевичском районе под посадками обоих сортов клюквы начало вегетационного периода отмечено увеличением в разных вариантах опыта содержания обменного калия на 17–170 % по сравнению с контролем при менее выраженных различиях в содержании подвижных соединений фосфора, составлявших 16–73 % под посадками сорта Ben Lear и не превышавших 6–9 % под таковыми сортами Stevens, причем исключительно при внесении минерального удобрения и обработках Экогум-комплексом, тогда как применение микробного препарата в 5%-ной концентрации не повлияло на содержание в корнеобитаемой зоне доступного фосфора, а в 10%-ной даже обусловило его снижение на 9 % относительно контроля. В отличие от данных элементов, обнаруживших более выраженное накопление под опытными посадками раннеспелого сорта, нежели позднеспелого, для легкогидролизуемого азота наблюдалась противоположная картина.

Так, под сортом Ben Lear пополнение его запасов в субстрате за счет  $N - NO_3^-$  отмечено лишь в двух вариантах опыта – на фоне внесения Basacot Plus 6 и 5%-ного МаклоРа, тогда как в остальных случаях имело место либо весьма значительное снижение содержания элемента (на 16–36 %) по сравнению с контролем, либо отсутствие различий с ним в этом плане. В отличие от посадок раннеспелого сорта, под таковыми позднеспелого все испытываемые агроприемы обеспечивали заметное обогащение субстрата легкогидролизуемым азотом на 37–111 % по сравнению с контролем, причем в основном в аммонийной форме, и лишь при обработках растений Экогум-комплексом это происходило за счет его нитратной формы (см. табл. 3). Несмотря на выявленные сортовые различия в изменении в субстрате содержания азота, с одной стороны, и фосфора и калия, с другой стороны, величина совокупного позитивного эффекта под действием органического и микробного удобрения, особенно в 10%-ной концентрации, под сортом Stevens оказалась в 1,8–5,5 раза большей, а при внесении минерального удобрения в 1,9 раза меньшей, чем под сортом Ben Lear.

В середине вегетационного периода наблюдалось существенное усиление таксономических различий в степени аккумуляции питательных элементов в корнеобитаемой зоне субстрата, главным образом, за счет легкогидролизуемого азота, для которого под посадками раннеспелого сорта показано преимущественное истощение запасов его обеих форм на 18–98 % по сравнению с контролем на фоне их увеличения на 32–300 % под таковыми позднеспелого сорта. Вместе с тем наиболее значительным данное увеличение, как и под посадками сорта Ben Lear, оказалось при внесении 5%-ного МаклоРа, причем под обоими таксонами клюквы оно обусловлено усилением накопления исключительно нитратной формы азота. При этом под посадками раннеспелого сорта положительное значение суммарного эффекта от испытываемых агроприемов показано только в двух вариантах опыта – при использовании минерального удобрения и 5%-ного МаклоРа, тогда как на фоне применения его 10%-ной концентрации, как и Экогум-комплекса, полученный результат был отрицательным. Заметим, что в летний период 2020 г., как и в весенний, среди испытываемых биологических удобрений наиболее заметным позитивным влиянием на состояние агрохимического фона в корнеобитаемой зоне характеризовался 5%-ный МаклоР. Что касается субстрата под посадками позднеспелого сорта клюквы, то, как и под таковыми раннеспелого, в середине сезона наибольшее увеличение в субстрате общих запасов основных питательных элементов относительно контроля наблюдалось при внесении Basacot Plus 6, а среди биологических удобрений наиболее результивным в этом плане оказался Экогум-комплекс. При этом внесение 5%-ного МаклоРа, уступавшее последнему по общей эффективности в 1,3 раза, обеспечивалось исключительно усилением накопления на 26 % нитратной формы азота на фоне ослабления такового его аммонийной формы и обменного калия на 50–57 %, что свидетельствовало об определенном дисбалансе в режиме минерального питания сорта Stevens (см. табл. 3). В связи с этим внесение 10%-ного МаклоРа, обеспечивающего в эксперименте сравнительно пропорциональное увеличение в субстрате содержания основных питательных элементов на 27–55 % относительно контроля, представляется нам более благоприятным в этом плане, несмотря на получение в 2,2 раза меньшего, чем в предыдущем случае, совокупного позитивного эффекта от испытываемых агроприемов. К окончанию вегетационного периода, в связи с преимущественным потреблением растениями соединений фосфора и калия после завершения фазы активного роста, на фоне внесения минерального удобрения установлено заметное сокращение различий с контролем в содержании данных элементов под посадками раннеспелого сорта по сравнению с весенним и летним периодами, что представляется весьма логичным. В свою очередь, это обусловило также снижение величины суммарного эффекта от внесения Basacot Plus 6 в осенний период.

В вариантах опыта с применением биологических удобрений при обработках растений Экогум-комплексом наблюдалось обогащение субстрата более чем на 60 % легкогидролизуемым азотом исключительно за счет его аммонийной формы и на 15 % обменным калием, что даже при некотором отставании от контроля в содержании подвижного фосфора позволило достичь в 2,2 раза более значительного, нежели при внесении минерального удобрения, совокупного положительного эффекта (см. табл. 3).

**Таблица 3. Относительные различия с контролем вариантов полевого опыта с внесением удобрений по содержанию доступных форм основных элементов питания в торфяном субстрате под посадками виргинской клюквы крупноплодной в начале, середине и конце вегетационного периода в Смоловичском районе, % в годы исследований**

**Table 3. Relative differences with the control of field experiment variants with the introduction of fertilizers in the content of available forms of the main nutritional elements in the peat substrate under large-fruited virgin cranberry plantings at the beginning, middle and end of the growing season in the Smolevichi district, % in the years of research**

Вариант опыта	Май					Июль				Сентябрь					Совокупный эффект (за сезон)	
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Совокупный эффект	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Совокупный эффект	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Совокупный эффект	
<b>2020 г.</b>																
<i>Copm Ben Lear</i>																
2	–	+16,4	+73,1	+149,0	+238,4	+16,7	–32,3	+65,4	+121,0	+170,7	+21,8	–30,1	+34,6	+6,9	+33,2	+442,3
3	–	–47,3	+15,9	+80,7	+49,3	–33,0	–38,7	+8,1	+27,4	–36,1	+96,2	–32,9	–4,9	+14,5	+72,9	+86,1
4	–15,7	+54,6	+19,0	+18,3	+76,2	–18,4	+25,8	+77,7	+51,4	+136,5	–54,7	+27,4	–9,9	–34,1	–71,2	+141,5
5	–35,7	–45,5	+38,2	+77,3	+34,4	–69,0	–29,0	+16,3	+44,8	–37,0	–16,4	+17,8	–14,8	+63,1	+49,8	+47,2
<i>Copm Stevens</i>																
2	+52,2	–	+6,3	+69,2	+127,8	+21,7	+120,0	+102,3	+144,5	+388,4	+19,4	+928,2	+453,2	+342,9	+1743,6	+2259,8
3	–41,6	+111,	+9,3	+17,0	+95,8	+25,6	+260,0	+8,9	+27,7	+322,2	–30,1	–5,1	+160,0	+107,0	+231,7	+649,7
4	+74,3	–11,1	–	+71,0	+133,7	–57,3	+356,0	–	–44,9	+253,9	–46,2	+123,1	+93,4	+62,9	+233,3	+620,9
5	+36,7	–7,4	–9,1	+170,4	+190,6	–	+32,0	+26,6	+55,2	+113,7	–53,5	+5,1	+53,4	+94,2	+99,2	+403,5
<b>2021 г.</b>																
<i>Copm Ben Lear</i>																
2	–37,7	+27,9	+46,6	+41,5	+78,3	+55,1	+7,6	+6,9	+54,4	+124,0	–91,7	+33,8	+37,3	+35,4	+14,8	+217,1
3	–38,6	+9,8	+12,0	+19,6	+2,8	+26,5	–	–	+19,4	+45,9	–65,9	–52,9	–	+51,7	–67,1	–18,4
4	–49,7	+19,7	–	–11,1	–41,1	–59,0	–	–6,0	–11,9	–76,9	–64,6	–59,6	+67,8	+57,7	+1,3	–116,7
5	–66,3	+14,8	+10,4	+21,3	–19,8	–34,9	–21,7	–7,1	+28,0	–35,7	–66,2	–58,8	–20,3	+58,4	–86,9	–142,4
<i>Copm Stevens</i>																
2	+55,7	–37,7	+21,0	+68,4	+107,4	–23,9	–19,6	+22,8	+114,8	+94,1	–79,7	+12,9	+32,7	+31,3	–2,8	+198,7
3	+25,7	–51,3	–21,6	–	–47,2	–47,5	–35,8	–	+27,1	–56,2	+188,9	–	+44,8	+63,2	+296,9	+193,5
4	–49,3	–58,8	–31,5	–16,0	–155,6	–50,5	–17,6	–	–6,1	–74,2	+132,9	–8,1	–8,2	–	+116,6	–113,2
5	–53,3	–64,8	–16,2	+39,0	–95,3	–60,9	–34,5	+19,0	+69,8	–6,6	+78,4	–	+57,1	+72,9	+208,4	+106,5

П р и м е ч а н и е: прочерк (–) означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий с контролем при *P* > 0,05.

**Таблица 4. Относительные различия с контролем вариантов полевого опыта с внесением удобрений по содержанию доступных форм основных элементов питания в торфяном субстрате под посадками виргинильной клюквы крупноплодной в начале, середине и конце вегетационного периода в Докшицком районе, % в годы исследований**

**Table 4. Relative differences with the control of field experiment variants with the introduction of fertilizers in the content of available forms of the main nutritional elements in the peat substrate under large-fruited virginal cranberry plantings at the beginning, middle and end of the growing season in the Dokshitsy district, % in the years of research**

Вариант опыта	Май					Июль					Сентябрь					Совокупный эффект (за сезон)	
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Совокупный эффект	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Совокупный эффект	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Совокупный эффект		
<b>2020 г.</b>																	
<i>Copm Ben Lear</i>																	
2	-29,9	+5,6	+25,7	+35,6	+37,0	-	-11,4	+120,2	+92,9	+201,7	-20,5	+25,0	+55,1	+132,7	+192,3	+431,0	
3	-9,9	+8,3	+8,7	+33,6	+40,7	-	-36,7	+18,6	+21,7	+3,6	-	-	+16,0	+33,8	+49,8	+94,1	
4	+6,4	-22,2	+12,9	-	-2,9	-	+44,3	+37,0	+12,9	+94,2	-13,5	+91,3	-9,3	-10,9	+57,6	+148,9	
5	-13,4	-25,0	+29,9	-	-8,5	-8,2	-50,6	+32,5	-	-26,3	+9,3	+60,9	+41,4	+9,4	+121,0	+86,2	
<i>Copm Stevens</i>																	
2	-48,5	-	-19,6	+11,7	-56,4	-41,5	+26,5	+18,8	+34,2	+38,0	-31,0	-37,2	+87,7	+50,0	+69,5	+51,1	
3	-	+43,1	-27,9	+21,9	+37,1	-9,6	+86,5	-	+22,9	+99,8	+31,1	+33,5	+23,7	+34,3	+122,6	+259,5	
4	+35,0	+27,8	-	-	+62,8	-	-13,8	-11,8	+8,8	-16,8	+23,8	-8,6	+35,3	+20,9	+71,4	+117,4	
5	+21,4	+8,3	-8,2	+17,4	+38,9	+19,8	-73,8	-	+24,6	-29,4	-	-33,1	+44,1	+55,2	+66,2	+75,7	
<b>2021 г.</b>																	
<i>Copm Ben Lear</i>																	
2	+52,6	+30,9	+62,9	-59,7	+86,7	-42,5	+23,8	+17,0	+21,1	+19,4	-6,3	-27,7	-8,3	+15,8	-21,5	+84,6	
3	+45,1	-16,2	-12,9	-72,0	-56,0	-6,4	-26,0	-15,3	+26,2	-21,5	+152,3	-45,4	-	+6,5	+113,4	+35,9	
4	+48,2	+28,7	+32,4	-72,8	+36,5	-	-25,5	+20,2	-	-5,3	+35,3	-42,2	-8,3	-17,8	-33,0	-1,8	
5	+45,9	-	+43,6	-69,0	+20,5	-14,9	-21,6	+23,2	+6,7	-6,6	-21,3	-50,2	+8,3	+14,5	-48,7	-34,8	
<i>Copm Stevens</i>																	
2	+59,1	-30,1	+41,6	+418,3	+488,9	-	-18,7	+8,5	+25,2	+15,0	-48,5	-15,1	+19,8	+14,2	-29,6	+474,3	
3	+188,8	-	+13,3	+21,9	+224,0	-35,8	-27,3	+23,7	+61,1	+21,7	-20,2	-18,3	-8,3	+13,8	-33,0	+212,7	
4	+80,7	-16,9	+18,2	+11,2	+93,2	+11,7	+5,9	+17,0	+26,5	+61,1	-39,1	-10,8	-33,0	+16,5	-66,4	+87,9	
5	+29,0	+51,5	-6,8	+11,6	+85,3	-16,7	+47,6	-	+41,2	+72,1	-41,8	-30,6	+5,0	+11,9	-55,5	+101,9	

П р и м е ч а н и е: прочерк (-) означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий с контролем при *P* > 0,05.

Заметим, что в конце сезона, в отличие от весенне-летнего периода с его наиболее успешным в плане обогащения субстрата питательными элементами внесения 5%-ного Маклора, напротив, показано доминирование отставания от контроля их содержания на 10–34 %, обусловившее получение впервые за вегетацию отрицательного совокупного эффекта. При этом на фоне внесения 10%-ного Маклора, из-за установленного в конце сезона весьма значительного усиления накопления в субстрате обменного калия, несмотря на практически полное отсутствие различий с контролем в общем количестве усвоемого азота и даже отставание от него на 15 % в содержании подвижного фосфора, получен положительный суммарный эффект.

Что касается позднеспелого сорта клюквы, то, как и на предыдущих этапах сезонного развития, изменение агрохимического фона в его корнеобитаемой зоне под действием испытываемых агроприемов проявилось намного выразительнее, нежели у сорта Ben Lear. В отличие от раннеспелого сорта, на протяжении всего вегетационного периода 2020 г. в корнеобитаемой зоне сорта Stevens наблюдалось последовательное увеличение позитивных различий тестируемых вариантов с контролем по содержанию доступных соединений фосфора и калия при достижении максимальных значений данных различий в конце сезона. При этом на фоне внесения минерального удобрения подобный накопительный эффект установлен и для легкогидролизуемого азота, тогда как при использовании биологических удобрений имело место истощение его запасов в аммонийной форме, что подтверждалось отставанием этих вариантов опыта от контроля по данному признаку на 30–54 %. Лишь внесение 5%-ного Маклора обеспечивало превышение контрольного уровня содержания элемента в нитратной форме на 123 %, что, впрочем, нельзя рассматривать как позитивное явление.

Как следует из табл. 3, в Смолевичском районе на протяжении вегетационного периода 2020 г. обогащение корнеобитаемой зоны торфяного субстрата основными питательными элементами относительно контроля протекало в 4,4–8,5 раза активнее под растениями позднеспелого сорта, нежели раннеспелого, что могло быть обусловлено разными причинами. Возможно, это связано с генотипическими различиями физиологических потребностей в питании у таксонов клюквы с разными сроками созревания плодов. Можно также предположить наличие у позднеспелого сорта более выраженного, чем у раннеспелого, стимулирующего действия корневых выделений на активность микроорганизмов в зоне ризогенеза, способствующего активизации перевода закрепленных в субстрате питательных элементов в легкодоступную форму. Следует заметить, что с подобными различиями минерального фона в зависимости от генотипа растений мы сталкивались также при проведении аналогичных исследований с разными таксонами голубики высокорослой [9], что указывает на наличие явной сортоспецифичности в процессе его формирования, обусловленной, возможно, различиями биологического выноса питательных элементов.

В пользу данного предположения свидетельствовали также результаты исследований в следующем вегетационном сезоне 2021 г., в начале которого во всех вариантах опыта с внесением удобрений в корнеобитаемой зоне раннеспелого сорта клюквы наблюдалось усиление накопления нитратного азота на 10–28 % относительно контроля на фоне ослабления такового аммонийного на 38–66 %, тогда как под растениями позднеспелого сорта наблюдалась противоположная картина – снижение содержания нитратного азота на 38–65 % при обогащении субстрата аммонийным на 26–56 %, впрочем, исключительно при использовании Экогум-комплекса и минерального удобрения (см. табл. 3). Внесение же обеих доз микробного удобрения обеспечивало сходное по величине под посадками обоих сортов клюквы обеднение корнеобитаемой зоны аммонийной формой азота, что вкупе с истощением запасов его нитратной формы под сортом Stevens приводило к ее обеднению легкогидролизуемым азотом на 108–118 % по сравнению с контролем.

Аналогичная картина наблюдалась и в отношении доступных соединений фосфора и калия при наиболее выраженном обогащении ими субстрата, как и в предыдущем сезоне, на фоне внесения минерального удобрения. Тем не менее под посадками раннеспелого сорта пополнение запасов подвижных фосфатов на 10–47 % имело место во всех вариантах опыта, кроме варианта с использованием 5%-ного Маклора, тогда как под посадками позднеспелого сорта позитивный эффект, вдвое меньший, чем под таковыми раннеспелого, отмечен лишь на фоне внесения Basacot Plus 6, тогда как при использовании всех биологических удобрений установлено истощение запасов этого элемента на 16–32 % относительно контроля. В начале вегетационного периода 2021 г. в субстрате под посадками обоих сортов клюквы значительно слабее, чем в предыдущем сезоне, происходило также накопление обменного калия. Как следует из табл. 3, под растениями раннеспелого сорта накопительный эффект в размере 21–42 % проявился во всех вариантах опыта, кроме варианта с использованием 5%-ного Маклора. При этом наиболее значительным, хотя и уступавшим прошлогоднему в 3,6 раза, он оказался на фоне внесения минерального удобрения, тогда как под посадками позднеспелого сорта его максимальное значение, установленное опять-таки в этом варианте опыта, было сопоставимо с таковым в предыдущем сезоне. Заметим, что у обоих сортов клюквы пополнению запасов данного элемента в субстрате на 21 и 39 % относительно контроля способствовало внесение 10%-ного Маклора.

Различия темпов обогащения корнеобитаемой зоны основными питательными элементами в зависимости от вида удобрений заметно отразились на величине совокупного эффекта от их применения, с учетом ориентации различий тестируемых вариантов опыта с контролем. При позитивных

изменениях данного показателя наиболее значительной для обоих сортов клюквы, особенно позднеспелого, она оказалась на фоне внесения минерального удобрения, тогда как совокупный эффект от применения бактериального удобрения был отрицательным и под посадками сорта Ben Lear составлял 20–41 %, а под таковыми сорта Stevens достигал 95–156 %, что в обоих случаях свидетельствовало об отставании темпов высвобождения питательных элементов изочно связанного состояния от размеров их потребления опытными растениями. При этом на фоне обработок растений Экогумкомплексом величина положительного совокупного эффекта под посадками раннеспелого сорта была крайне незначительной, а под таковыми позднеспелого имела отрицательную направленность и составляла 47 %.

В середине вегетационного периода 2021 г. при использовании удобрений наблюдалась довольно близкая установленной на предыдущем этапе развития растений клюквы картина изменений в содержании основных питательных элементов в торфяном субстрате по сравнению с контролем. На наш взгляд, это объясняется заметным снижением потребностей культиваров в питании в связи с окончанием активной фазы вегетативного роста. Как видим, в летний период 2021 г. различия с контролем в ориентации и величине совокупного эффекта в изменении агрохимического фона под действием минерального удобрения и Экогум-комплекса были сопоставимы с таковыми в начале сезона, тогда как при внесении бактериального удобрения наблюдалось их заметное уменьшение при сохранении отрицательной направленности, наиболее значительное при использовании МакЛоРа в 10%-ной концентрации, что косвенно свидетельствовало либо о сокращении потребления питательных элементов опытными растениями на данном этапе их развития, либо об активизации функционирования микробиоты, способствовавшей их высвобождению из органического вещества торфа (см. табл. 3).

В конце вегетационного периода на фоне внесения минерального удобрения под посадками обоих сортов клюквы отмечено обеднение корнеобитаемой зоны аммонийной формой азота на 80–92 % по сравнению с контролем, тогда как при использовании биологических удобрений аналогичная, но менее выраженная картина, с отставанием от последнего на 65–66 %, наблюдалась только под сортом Ben Lear. При этом для субстрата под сортом Stevens, напротив, показано обогащение на 78–189 % аммонийным азотом, наиболее значительное при обработках растений Экогумкомплексом, что даже при отсутствии изменений в содержании нитратного азота, но вкупе с пополнением запасов подвижного фосфора и обменного калия на 45 и 63 % соответственно, обусловило получение на данном этапе наиболее значимого положительного совокупного эффекта от использования этого удобрения. Подобная картина изменения агрохимического фона в корнеобитаемой зоне позднеспелого сорта наблюдалась также при внесении 10%-ного МакЛоРа, тогда как его применение в 5%-ной концентрации не способствовало пополнению в ней запасов доступных соединений фосфора и калия, что обусловило получение вдвое меньшего, чем в предыдущем случае, положительного совокупного эффекта.

Вместе с тем в корнеобитаемой зоне раннеспелого сорта клюквы при применении биологических удобрений, как и в предыдущем случае, наблюдалось преимущественное усиление накопления обменного калия. Тем не менее, из-за весьма заметного истощения в нем запасов обеих форм легкогидролизуемого азота и неоднозначных изменений в содержании доступного фосфора, совокупный эффект при использовании Экогум-комплекса и 10%-ного МакЛоРа оказался отрицательным. Однако, как и годом ранее, наиболее значительный позитивный совокупный эффект за весь вегетационный период получен на фоне внесения минерального удобрения. Как следует из табл. 3, в условиях сезона 2020 г. эффективность последнего в плане обогащения торфяного субстрата основными питательными элементами превосходила таковую испытываемых биологических удобрений под сортом Ben Lear в 3–9 раз, а под сортом Stevens – в 3–6 раз при наибольших различиях на фоне внесения 10%-ного МакЛоРа и наименьших при его использовании в 5%-ной концентрации в первом случае и Экогум-комплекса во втором.

В условиях сезона 2021 г. результативность всех испытываемых агроприемов в плане обогащения субстрата питательными элементами оказалась существенно ниже по сравнению с предыдущим сезоном, что можно объяснить увеличением их потребления по мере взросления растений, а также усилением непродуктивного выноса при интенсивном выпадении осадков. При этом под посадками обоих сортов клюквы при относительной сопоставимости суммарной за сезон эффективности внесения минерального удобрения, оказавшейся в оба года исследований наиболее высокой в рамках эксперимента, ее величина уступала установленной годом ранее под сортом Ben Lear в 2 раза, а под сортом Stevens – в 11 раз.

Нетрудно убедиться, что в Смолевичском районе результативность испытываемых видов удобрений в плане обогащения торфяного субстрата питательными элементами под посадками клюквы крупноплодной в значительной мере определялась комплексным воздействием ряда факторов, в том числе погодными условиями вегетационного периода, регулирующими активность микробиологических процессов в корнеобитаемой зоне и обеспечивающими тем самым доступность растениям питательных элементов, генотипическими особенностями их потребления в зависимости от сроков

созревания плодов и стадии развития культиваров. Тем не менее в результате данных исследований установлено, что на протяжении всего периода наблюдений совокупный за вегетационный период позитивный эффект от испытываемых агроприемов под посадками позднеспелого сорта клюквы оказался значительнее, нежели под таковыми раннеспелого, при наибольшей результативности в обоих случаях внесения минерального удобрения и в меньшей степени обработка растений Экогум-комплексом.

Аналогичные исследования с виргинильными растениями модельных сортов клюквы крупноплодной в более северном Докшицком районе показали наличие определенного сходства со Смолевичским районом в изменении агрохимического фона в торфяном субстрате под действием испытываемых агроприемов, но вместе с тем выявили и некоторые региональные особенности в накоплении питательных элементов. Как следует из табл. 4, в начале вегетационного периода 2020 г., в связи с активизацией ростовых процессов у опытных растений, в большинстве вариантов опыта, как и в предыдущем эксперименте, в корнеобитаемой зоне раннеспелого сорта Ben Lear преобладало снижение содержания легкогидролизуемого азота при доминировании накопительных тенденций в изменении содержания подвижного фосфора и обменного калия, тогда как под посадками позднеспелого сорта Stevens, напротив, наблюдалось обогащение торфяного субстрата обеими формами доступного азота, обусловленное, скорее всего, ограничением потребления данного элемента из-за запаздывания сроков формирования его вегетативных органов. Вместе с тем в начале сезона в корнеобитаемой зоне обоих сортов клюквы, как и в Смолевичском районе, выявлено усиление накопления обменного калия, а в субстрате под раннеспелым сортом также доступных соединений фосфора. Однако в отличие от более южного района исследований, здесь при внесении минерального удобрения в обоих случаях наблюдалось обеднение субстрата легкогидролизуемым азотом на 24–49 % относительно контроля, а под посадками сорта Stevens также подвижными соединениями фосфора на 20 %. Более того, в Докшицком районе относительные различия с контролем в изменении содержания в субстрате основных питательных элементов на фоне всех испытываемых агроприемов оказались менее выражительными, нежели в Смолевичском районе, что обусловило заметное уменьшение положительного совокупного эффекта. При этом впервые в данных исследованиях в варианте опыта с применением минерального удобрения на посадках сорта Stevens этот показатель характеризовался отрицательной направленностью.

В середине вегетационного периода 2020 г. выявлено также заметное сходство с экспериментом в Смолевичском районе в трансформации агрохимического фона под посадками раннеспелого сорта при использовании удобрений. Это проявилось в существенной, а в ряде случаев и сопоставимой по величине в обоих районах исследований активизации накопления в субстрате доступных соединений фосфора и калия по сравнению с контролем, максимальной при внесении минерального удобрения, что сопровождалось его обеднением нитратной формой азота, и лишь в варианте опыта с внесением 5%-ного МаКлоРа отмечено увеличение ее содержания. Однако в отличие от предыдущего, в данном эксперименте под посадками сорта Ben Lear не обнаружено значимого расходования аммонийного азота на формирование текущего прироста надземной фитомассы, что, на наш взгляд, в условиях острого дефицита влаги в этот период обусловлено либо ограничением его потребления, либо ингибированием микробиологических процессов, обеспечивавших высвобождение элемента из органического вещества торфа. Тем не менее в обоих районах исследований при определении размеров суммарной эффективности испытываемых агроприемов в середине вегетационного периода обнаружилось явное сходство в характере межвариантных различий по данному признаку при наиболее значительном обогащении субстрата питательными элементами на фоне внесения минерального удобрения и вдвое меньшей результативности использования 5%-ного МаКлоРа (см. табл. 3, 4).

В отличие от раннеспелого сорта, в трансформации агрохимического фона в корнеобитаемой зоне позднеспелого сорта Stevens выявлено лишь частичное сходство с экспериментом в Смолевичском районе. Оно проявилось в стимулирующем влиянии испытываемых агроприемов на накопление в субстрате обменного калия при четырехкратном сокращении различий с контролем при внесении минерального удобрения, а также в подтверждении позитивных изменений в содержании нитратного азота, наблюдавшихся также при обработках растений Экогум-комплексом, хотя и выраженных в 3–4 раза слабее, чем в Смолевичском районе, и сопровождавшихся обеднением субстрата аммонийным азотом на 10–42 %. Вместе с тем внесение микробного удобрения обусловило здесь снижение запасов нитратного азота, наиболее значительное при использовании его 10%-ной концентрации, отчасти компенсируемое за счет усиления накопления аммонийной формы элемента. На наш взгляд, данные межрегиональные различия в этот период могли быть обусловлены подавлением активности бактериального удобрения в связи с более острым, чем в Смолевичском районе, дефицитом влаги. Что касается доступных соединений фосфора, то пополнение их запасов в субстрате, выраженное в 5,5 раза слабее, чем в предыдущем эксперименте, выявлено лишь на фоне внесения минерального удобрения (см. табл. 3, 4). Тем не менее в середине вегетационного периода 2020 г. общая результативность данного агроприема под посадками позднеспелого сорта клюквы имела позитивный характер, но оказалась на порядок меньшей, чем в Смолевичском районе.

Значительно большей, чем в данном случае, хотя и уступавшей таковой в последнем в 3,2 раза, она была на фоне обработок растений Экогум-комплексом, тогда как при использовании микробного препарата суммарный эффект характеризовался уже отрицательной направленностью при отставании от контроля на 17–29 %, особенно при внесении 10%-ного МакЛоРа.

В конце вегетационного периода 2020 г., в отличие от двух предыдущих этапов развития опытных растений, трансформация агрохимического фона в корнеобитаемой зоне раннеспелого сорта клюквы под действием испытываемых удобрений отличалась менее выраженным сходством с таковой в Смолевичском районе. В подтверждение этого следует отметить лишь наблюдавшееся здесь обогащение субстрата нитратным азотом на 61–91 % по сравнению с контролем, наибольшее при использовании бактериального удобрения, особенно в 5%-ной концентрации, а также обменным калием на 9–132 % во всех вариантах опыта, кроме последнего, и подвижным фосфором на 55 % при внесении минерального удобрения (см. табл. 3, 4). Вместе с тем в конце сезона суммарная эффективность большинства испытываемых агроприемов при позитивной направленности превышала таковую в Смолевичском районе в 2,5–5,8 раза. Это свидетельствовало либо о заметном сокращении размеров биологического выноса питательных элементов в более северном регионе, либо о замедлении темпов перевода их в доступные формы из-за острого дефицита влаги. Что касается позднеспелого сорта Stevens, то сходство с экспериментом в Смолевичском районе в трансформации агрохимического фона под его посадками, как и под таковыми раннеспелого сорта, проявилось лишь в поддержании исключительно накопительных тенденций в содержании подвижного фосфора и обменного калия, проявившихся здесь с наибольшей выразительностью на фоне внесения минерального удобрения и 10%-ного МакЛоРа. Однако относительные размеры превышения контрольного уровня параметров накопления данных элементов на фоне испытываемых удобрений в Докшицком районе оказались в 1,2–6,9 раза меньшими, чем в Смолевичском районе, при максимальных межрегиональных различиях при использовании минерального удобрения и Экогум-комплекса, на фоне которого наблюдалось обогащение субстрата также обеими формами легкогидролизуемого азота.

Заметим, что результативность испытываемых агроприемов в плане увеличения запасов питательных элементов под посадками позднеспелого сорта в конце вегетационного периода здесь существенно уступала таковой в более южном районе. Вместе с тем суммарная за вегетационный период 2020 г. эффективность используемых удобрений под посадками раннеспелого сорта клюквы Ben Lear оказалась сопоставимой с таковой в Смолевичском районе и характеризовалась не только положительной направленностью расхождений опытных вариантов с контролем по содержанию в субстрате питательных элементов, но и по величине данных расхождений. При этом в обоих районах исследований наиболее значительное обогащение ими корнеобитаемой зоны обеспечивало внесение минерального удобрения, а среди биологических удобрений – внесение 5%-ного МакЛоРа. Подобная эффективность испытываемых агроприемов под посадками позднеспелого сорта Stevens при положительной направленности различий с контролем по содержанию в субстрате основных питательных элементов уступала таковой в Смолевичском районе в 2,5–44 раза. При этом в обоих районах наиболее значительное обогащение ими корнеобитаемой зоны обеспечивало применение Экогум-комплекса и в меньшей степени 5%-ного МакЛоРа, а в Смолевичском районе также внесение минерального удобрения.

Как следует из табл. 3 и 4, межрегиональные различия в состоянии агрохимического фона в торфяном субстрате наиболее контрастно проявились в условиях сезона 2021 г., отмеченного существенными колебаниями температуры воздуха при остром дефиците влаги в июне и июле и ее избытке в остальные месяцы. Так, в Докшицком районе, в отличие от Смолевичского, в начале вегетационного периода в корнеобитаемой зоне обоих сортов клюквы во всех вариантах опыта наблюдалось усиление накопления аммонийного азота при неоднозначных изменениях в содержании нитратного. Наряду с этим все испытываемые удобрения, особенно минеральное, способствовали заметному усилинию по сравнению с предыдущим сезоном и с экспериментом в Смолевичском районе пополнения в торфяном субстрате запасов подвижного фосфора при противоположных изменениях в содержании обменного калия – увеличении под посадками позднеспелого сорта и снижении под таковыми раннеспелого. В результате этого величина совокупного эффекта в весенний период во всех вариантах опыта с использованием удобрений заметно превышала таковую не только в предыдущем сезоне, но и в более южном районе, что свидетельствовало об определенном ограничении потребления данных элементов преимущественно растениями сорта Stevens. На наш взгляд, это обусловлено не только сортовыми особенностями питательного режима растений клюквы с разными сроками созревания плодов, но и характером погодных условий в этот период с чрезвычайным обилием атмосферных осадков при низких температурах воздуха. На следующем этапе развития опытных растений, как и годом ранее, отмечено значительное расходование основных питательных элементов, особенно азота, на формирование их надземных органов, о чем свидетельствовало заметное, но все же менее выраженное, чем в Смолевичском районе, сокращение их запасов относительно контроля. На это

также указывали положительные значения совокупного эффекта во всех вариантах опыта с использованием удобрений под посадками сорта Stevens и существенно меньшие результирующие показатели обеднения субстрата питательными элементами при внесении микробного удобрения под посадками сорта Ben Lear.

В отличие от предыдущего сезона и более южного района исследований, в Докшицком районе в конце вегетационного периода наблюдалось заметное снижение потребления аммонийного азота растениями раннеспелого сорта, что подтверждалось не только сокращением отрицательных различий с контролем его содержания в вариантах опыта с внесением минерального удобрения и 10%-ного МаклоРа, но и весьма существенным накоплением при обработках Экогум-комплексом и при использовании 5%-ного МаклоРа. Вместе с тем для позднеспелого сорта клюквы, напротив, показано снижение на 20–48 % его содержания в субстрате по сравнению с контролем, сочетавшееся у обоих сортов со значительным истощением запасов нитратного азота (см. табл. 4). Обеднение торфяного субстрата легкогидролизуемым азотом в конце вегетационного периода, скорее всего, обусловлено не столько его потреблением растениями клюквы, сколько непродуктивным выносом данного высокоподвижного элемента за пределы корнеобитаемой зоны на фоне чрезвычайно высокого количества атмосферных осадков. В пользу данного предположения свидетельствует также более выраженное, чем в предыдущем сезоне, и более значительное, чем в Смолевичском районе, обеднение субстрата под посадками обоих сортов клюквы доступными соединениями фосфора и калия, что обусловило получение суммарного отрицательного эффекта от применения испытываемых удобрений (см. табл. 4). Лишь на фоне обработок растений раннеспелого сорта Экогум-комплексом, в результате трудно поддающегося объяснению высокого содержания в нем на данном этапе аммонийного азота, в 2,5 раза превышавшего таковое в контроле, результирующий показатель его эффективности в конце сезона оказался положительным.

**Заключение.** В результате исследования в 2020 и 2021 г. в опытной культуре в географически удаленных на 250 км друг от друга Смолевичском районе Минской области и в более северном Докшицком районе Витебской области на рекультивируемых участках торфяной выработки верхового типа влияния минерального Basacot Plus 6 ( $N_{15}P_8K_{12}$  кг/га д. в.) и отечественных биологических удобрений – азотфикссирующего и фосфатомобилизующего микробного МаклоР в 5%-ной и 10%-ной концентрациях, а также органо-минерального Экогум-комплекса на агрохимические свойства субстрата под посадками растений клюквы крупноплодной – раннеспелого Ben Lear и позднеспелого Stevens – в рамках идентичных полевых экспериментов установлено, что в оба сезона все испытываемые агроприемы способствовали его заметному обогащению питательными элементами. В Смолевичском районе на протяжении вегетационного периода 2020 г. оно протекало в 4,4–8,5 раза активнее под растениями позднеспелого сорта, нежели раннеспелого, причем эффективность минерального удобрения в накоплении последних превосходила таковую биологических под сортом Ben Lear в 3–9 раз, а под сортом Stevens – в 3–6 раз при наибольших различиях на фоне внесения 10%-ного МаклоРа и наименьших при его использовании в 5%-ной концентрации в первом случае и Экогум-комплекса во втором.

В условиях сезона 2021 г. результативность всех испытываемых агроприемов в обогащении торфяного субстрата питательными элементами существенно уступала таковой в предыдущем сезоне в связи с увеличением размеров их потребления (биологического выноса) при взрослении растений, а также из-за непродуктивного выноса на фоне обильного выпадения осадков. При относительной сопоставимости в оба сезона эффективности минерального удобрения под посадками обоих сортов клюквы, оказавшейся наиболее высокой в рамках эксперимента, ее величина уступала установленной годом ранее под сортом Ben Lear в 2 раза, а под сортом Stevens – в 11 раз. Показано, что применение биологических удобрений под посадками раннеспелого сорта клюквы в данном сезоне оказалось неэффективным, поскольку итоговый за вегетационный период показатель разнонаправленных изменений в их содержании относительно контроля был отрицательным с наименьшим значением при обработках растений Экогум-комплексом и наибольшим при внесении 10%-ного МаклоРа, тогда как под посадками позднеспелого сорта влияние биологических удобрений на состояние агрохимического фона в основном имело позитивный характер, особенно при использовании 10%-ного МаклоРа. При этом в Докшицком районе общая за вегетационный период эффективность испытываемых удобрений в плане обогащения субстрата питательными элементами относительно контроля под посадками сорта Ben Lear была сопоставима с таковой в Смолевичском районе, а под посадками сорта Stevens уступала ей в 2,5–44 раза.

Таким образом, все испытываемые удобрения способствовали обогащению субстрата основными питательными элементами по сравнению с контролем, тогда как степень данного обогащения определялась географическим положением района исследований, погодными условиями вегетационного периода, генотипом опытных растений и стадией их сезонного развития. Тем не менее, независимо от всех обозначенных факторов, в большинстве случаев наиболее результативным в этом плане следовало признать внесение минерального удобрения, а среди биологических удобрений – использование Экогум-комплекса и 5%-ного МаклоРа.

### Список использованных источников

1. Буткус, В. Обогащение ресурсов клюквы / В. Буткус // Вопросы структурной и функциональной реабилитации. – Вильнюс, 1980. – С. 27–29.
2. Костенко, Н. Я. Некоторые приемы мобилизации потенциального плодородия выработанных торфяников низинного типа : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.533 / Н. Я. Костенко ; Львов. с.-х. ин-т. – Львов, 1970. – 137 с.
3. Крещапова, В. Н. Генетические особенности и оценка плодородия выработанных торфяников России / В. Н. Крещапова // Повышение эффективности мелиорации сельскохозяйственных земель : доклады Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию Ин-та мелиорации и луговодства НАН Беларуси и 95-летию со дня рожд. акад. С. Г. Скоропанова, Минск, 20–22 сент. 2005 г. / Нац. науч. Беларуси, М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, Ин-т мелиорации и луговодства НАН Беларуси. – Минск, 2005. – С. 175–181.
4. Пацевич, В. Г. Фракционный состав фосфатов и доступность фосфора для растений в почвах выработанных торфяников Ленинградской области : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.04 / В. Г. Пацевич. – Л., 1984. – 134 с.
5. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения аммиачного азота : ГОСТ 27894.3-88. – Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 11 с.
6. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения нитратного азота : ГОСТ 27894.4-88. – Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 13 с.
7. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения подвижных форм фосфора : ГОСТ 27894.5-88. – Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.
8. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения подвижных форм калия : ГОСТ 27894.6-88. – Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 5 с.
9. Эффективность микробных удобрений при возделывании голубики на выработанных торфяниках Беларуси / Ж. А. Рупасова. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 236 с.

### References

1. Butkus V. *Enrichment of cranberry resources* [Enrichment of cranberry resources]. *Voprosy strukturnoj i funkcional'noj reabilitacii*. Vilnius, 1980, pp. 27–29. (in Russian)
2. Kostenko N. Ya. *Nekotorye priemy mobilizacii potencial'nogo plodorodiya vyrabotannyh torfyanikov nizinnogo tipa* [Some methods of mobilizing the potential fertility of developed lowland peatlands. Cand. of agro. sci. diss.]. Lviv, 1970, 137 p. (in Russian)
3. Kreshtapova V. N. *Geneticheskie osobennosti i ocenka plodorodiya vyrabotannyh torfyanikov Rossii* [Genetic characteristics and fertility assessment of developed peatlands in Russia]. *Povyshenie effektivnosti melioracii sel'skohozyajstvennyh zemel'*: dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 75-letiyu In-ta melioracii i lugo-vodstva NAN Belarusi i 95-letiyu so dnya rozhd. akad. S. G. Skoropanova [Proc. of the Int. sci. and pract. conf. dedicated to the 75th anniversary of the Inst. of Land Reclamation and Meadow Science of the NAS of Belarus and the 95th anniversary of the birth of Academician S. G. Skoropanov "Improving the efficiency of agricultural land reclamation"]. Minsk, 2005, pp. 175–181. (in Russian)
4. Patsevich V. G. *Frakcionnyj sostav fosfatov i dostupnost' fosfora dlya rastenij v pochvah vyrabotannyh torfyanikov Leningradskoj oblasti*. Diss. cand. s.-h. nauk [The fractional composition of phosphates and the availability of phosphorus for plants in the soils of the exhausted peat bogs of the Leningrad region. Cand. of agro. sci. diss.]. Leningrad, 1984, 134 p. (in Russian)
5. GOST 27894.3-88. *Torf i produkty ego pererabotki dlya sel'skogo hozyajstva. Metody opredeleniya ammiachnogo azota* [State Standard 27894.3-88. Peat and its processed products for agriculture. Methods for determination of ammonia nitrogen]. Moscow, Standart Publ., 1989, 11 p. (in Russian)
6. GOST 27894.4-88. *Torf i produkty ego pererabotki dlya sel'skogo hozyajstva. Metody opredeleniya nitratnogo azota* [State Standard 27894.4-88. Peat and its processed products for agriculture. Methods for determination of nitrate nitrogen]. Moscow, Standart Publ., 1989, 13 p. (in Russian)
7. GOST 27894.5-88. *Torf i produkty ego pererabotki dlya sel'skogo hozyajstva. Metody opredeleniya podvizhnyh form fosfora* [State Standard 27894.5-88. Peat and its processed products for agriculture. Methods for determining mobile forms of phosphorus]. Moscow, Standart Publ., 1989, 8 p. (in Russian)
8. GOST 27894.6-88. *Torf i produkty ego pererabotki dlya sel'skogo hozyajstva. Metody opredeleniya podvizhnyh form kaliya* [State Standard 27894.6-88. Peat and its processing products for agriculture. Methods for determining mobile forms of potassium]. Moscow, Standart Publ., 1989, 5 p. (in Russian)
9. Rupasova J. A. *Effektivnost' mikrobnyh udobrenij pri vozdelivanii golubiki na vyrabotannyh torfyanikah Belarusi* [Efficiency of microbial fertilizers in blueberry cultivation on depleted peatlands in Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2020, 236 p. (in Russian)

### Информация об авторах

Рупасова Жанна Александровна – доктор биологических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, главный научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

### Information about the authors

Zhanna A. Rupasova – Dr. Sc. (Biological), Corresponding Member of the NAS of Belarus, Professor, Chief Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Surganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

*Яковлев Александр Павлович* – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией экологической физиологии и химии растений, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: yakovlev@cbg.org.by

*Коломиец Эмилия Ивановна* – доктор биологических наук, академик НАН Беларуси, профессор, генеральный директор, ГНПО «Химический синтез и биотехнологии» (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: kolomiets@biotech.bas-net.by

*Алещенко Зинаида Михайловна* – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, ГНУ «Институт микробиологии НАН Беларусь» (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

*Картыжова Лилия Евгеньевна* – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

*Зимич Светлана Павловна* – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: antohina\_lana@mail.ru

*Вашкевич Марина Николаевна* – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: marivashkevich@yandex.by

*Авраменко Станислав Николаевич* – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь», (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: auramekastas@gmail.com

*Лешков Алексей Александрович* – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: yakovlev@cbg.org.by

*Aleksandr P. Yakovlev* – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory of Ecological Physiology and Chemistry of Plants, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Surganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: yakovlev@cbg.org.by

*Emilia I. Kolomiets* – Dr. Sc. (Biological), Academician of the NAS of Belarus, Professor, General Director, State Scientific and Production Association "Chemical Synthesis and Biotechnology" (2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: kolomiets@biotech.bas-net.by

*Zinaida M. Aleshchenkova* – Dr. Sc. (Biological), Professor, Chief Researcher, State Scientific Institution "Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus" (2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

*Liliya E. Kartyzhova* – Ph. D. (Biology), Leading Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

*Svetlana P. Zimich* – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Surganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: antohina\_lana@mail.ru

*Marina N. Vashkevich* – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Surganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: marivashkevich@yandex.by

*Stanislav N. Avramenko* – junior researcher at the laboratory of plant chemistry of the State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Surganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: auramekastas@gmail.com

*Aleksey A. Leshkov* – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Surganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: yakovlev@cbg.org.by

## ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННОГО ГРИБНОГО СУБСТРАТА МЕТОДОМ ВЕРМИКОМПОСТИРОВАНИЯ

М. А. Шелоник, Г. Г. Янута

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** В связи с повышенным интересом в последние годы к грибоводству актуальными становятся вопросы переработки отработанного грибного субстрата. Перспективным и экологически безопасным методом для решения этой проблемы является вермикомпостирование. Приведены доводы по использованию отработанного грибного субстрата в качестве источника питания для вермикультуры. Исследованы свойства вермикомпоста относительно его влияния на растения с помощью вегетационных и фитотоксических опытов. Полученные результаты свидетельствуют, что для образца, переработанного с помощью вермикомпостиования, отмечается высокая ростостимулирующая активность, в сравнении с образцом без переработки. Метод вермикомпостиования позволяет не только переработать образующиеся отходы, но и получить новые продукты с улучшенными биологическими и физико-химическими свойствами, которые могут найти применение в сельском хозяйстве.

**Ключевые слова:** отработанный грибной субстрат; вермикомпостирование; вермикомпост; грибоводство; вермитехнология.

**Для цитирования.** Шелоник М. А., Янута Г. Г. Переработка отработанного грибного субстрата методом вермикомпостиирования // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 174–182.

## RECYCLING OF USED SPENT MUSHROOM SUBSTRATE BY A VERMICOMPOSTING METHOD

М. А. Shelonik, G. G. Yanuta

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

**Abstract.** All over the world, the formation of difficult-to-process waste is a pressing issue for all industries, including mushroom growing, whose volumes of waste production can be up to 60 %. Storing, burying or burning waste does not solve the problem, but only aggravates the negative consequences, especially in relation to the environment. A possible and promising solution to this problem may be the use of vermicomposting, since it allows not only completely process waste, but also obtain new environmentally friendly products. It has been established that spent mushroom substrate processed by worms has growth-stimulating activity in relation to plants, which increased as it was processed, and a complete absence of phytotoxicity.

**Keywords:** spent mushroom substrate; vermicomposting; vermicompost; mushroom growing; vermitechnology.

**For citation.** Shelonik M. A., Yanuta G. G. Recycling of used spent mushroom substrate by the vermicomposting method. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 174–182.

**Введение.** Ежегодно в мире образуется около 3,5 млрд т отходов, из них 2,1 млрд т составляют твердые коммунальные отходы, 1,2 млрд т – отходы от сельскохозяйственных предприятий [1]. Не менее трети из всех отходов не перерабатывается экологически безопасным методом, что объясняется постоянно растущими объемами и сложностью состава образующихся отходов. Грибоводство как активно развивающаяся отрасль данная проблема не обошла стороной. Высокий спрос на продукцию и переход населения планеты на здоровое питание не только способствуют развитию грибного рынка, но вместе с тем увеличивают объемы образуемых отходов. Согласно статистическим данным, на 1 кг продукции образуется около 4–5 кг отработанного грибного субстрата (далее – ОГС) [2]. ОГС представляет собой отход грибоводческих предприятий, который содержит остатки мицелия и плодовых тел грибов, большое количество питательных и минеральных веществ, в том числе макро- и микроэлементов (азот, кальций, калий и др.). Богатый химический состав и низкая себестоимость отхода позволили мировым производителям, в первую очередь это касается стран Азии, занимающих лидирующую позицию, использовать ОГС в различных сферах деятельности, начиная от сельского хозяйства и заканчивая энергетикой [3]. К сожалению, многие отечественные производители как крупных, так и мелких

предприятий не имеют подобных результатов и рассматривают ОГС в большей степени как отход производства, для которого один путь – складирование или захоронение. Использование ОГС таким образом имеет негативные последствия: во-первых, из-за растущих объемов образующихся отходов приходится отводить значительные площади для их складирования и захоронения, которые с каждым годом только растут, в то время как подавляющая часть отходов может быть переработана и использована в качестве сырья для создания новых материалов; во-вторых, значительное скопление отходов может привести к выделению опасных химических веществ или заражению патогенными микроорганизмами или другими вредителями, которые негативно влияют на окружающую среду. Переработка отхода является альтернативным путем, который выгоден как с экономической, так и с экологической точки зрения. Причем следует заметить, что наибольший интерес отдают биологическим направлениям, ввиду их экологической безопасности и эффективности в сравнении с другими. Одним из успешных на сегодня биотехнологических направлений является вермитехнология, которая разводят и использует специально выведенных дождевых червей с целью не только переработки отходов, но и получения экологически безопасной биопродукции.

Цель работы – применение метода вермикомпостирования путем переработки отработанного грибного субстрата для получения новых продуктов.

**Материалы и методы исследования.** Объектами исследования служили вермикультура технических дождевых червей и образцы ОГС до вермикомпостирования, после него, с добавлением мела. Для образцов ОГС определяли общетехнические характеристики (влажность, зольность, pH) согласно [4]; для определения ростостимулирующей активности проводили вегетационные и фитотоксические опыты. Вегетационные опыты проводили согласно ISO 11269-2:2012. Для определения вегетационной и фитотоксической активности в качестве тест-культуры использовали семена редьки масличной (*Brassica rapa*) с величиной всхожести не менее 80 %, предварительно прошедшие лабораторный контроль качества на всхожесть согласно ГОСТ 12038-84.

**Результаты и их обсуждение.** Вермитехнология – комплекс мероприятий, в ходе которых культура технических дождевых червей используется для переработки отходов и одновременно для получения новых продуктов. В настоящее время биотехнология переработки органических отходов с помощью вермитехнологии широко применяется во многих странах, особенно в США, Канаде, Китае, Индии и др. В Республике Беларусь также имеются, хоть и в малом количестве, предприятия, занимающиеся червями. В качестве источника питания для них чаще используют конский навоз из-за высокого содержания там целлюлозы. Однако в последнее время, ввиду невысокого развития коневодческой отрасли в нашей стране, предпочтение отдается более доступным отходам.

Вермитехнология условно разделяется на два биотехнологических направления: вермикультивирование и вермикомпостирование [5]. Вермикультивирование в большей степени ориентировано на интенсифицированное производство биомассы червей с целью их последующего применения в качестве кормовой добавки в животноводческих и рыбных хозяйствах. Вермикомпостирование, наоборот, сосредоточено на переработке различного профиля отходов и получении продукта, обогащенного экскрементами червей (копролитами), – вермикомпоста или биогумуса. Как правило, процесс вермикомпостирования происходит либо в контейнерах («закрытый метод»), либо в открытом пространстве в виде кучи («открытый метод»). Первый метод предпочтителен для малых хозяйств в небольших объемах, в то время как второй чаще используется для переработки больших объемов отходов [5, 6].

Согласно теории И. Н. Титова, дождевых червей по способу питания классифицируют на фитофагов (питающиеся растительными остатками или дебрисом), геофагов (питающиеся почвой) и геофилофагов (смешанное питание). По условиям среды обитания их также разделяют на эпигеики, анецики, эндогеики. Группа эпигеики обитает в основном в подстилке на поверхности почвы и пигментирована; эндогеики – обитают глубже в почвенном профиле (на 10–15 см), питаются как почвой, так и растительным опадом, в отличие от эпигеиков, они слабо пигментированы; анецики – относительно крупные виды, обитающие в вертикальных норах, которые могут простираться на несколько метров вглубь почвы. Наиболее подходят для вермикомпостирования эпигейные виды, благодаря их толерантности к меняющимся условиям окружающей среды, высокому уровню воспроизведения потомства с коротким жизненным циклом, высоким показателям скорости потребления и переваривания органических веществ, простоте культивирования. Из них для вермикомпостирования широко используют такие виды, как *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* и *Perionyx excavatus* [7].

Хотя дождевые черви и являются ключевыми игроками в процессе вермикомпостирования, именно микроорганизмы выполняют биохимическое разложение органического вещества, независимо от того, где они находятся: в почве или в кишечнике червя [8]. Присутствие синергетических отношений между дождевыми червями и микроорганизмами неоспоримо, поскольку благодаря своей деятельности, черви создают благоприятные условия для их работы [9]. Согласно литературным источникам, разделение микроорганизмов происходит на три группы: микроорганизмы, изначально обитающие в органическом субстрате; микроорганизмы, обитающие в кишечнике дождевых червей; микроорганизмы, обитающие в субстрате после его компостирования. Микробный биом был разделен между типами *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Firmicutes* и *Verrucimicrobia* [8–11]. Следует учитывать,

что в зависимости от перерабатываемого субстрата бактериальное сообщество меняется. Если взять субстрат из навоза, помета или сточных вод, то, как правило, материалы, перерабатываемые животными, имеют большее разнообразие и более высокую численность микроорганизмов. Из микроорганизмов, встречающихся в процессе вермикомпостирования, известны фосфатомобилизирующие *Bacillus* (*Firmicutes*), *Streptomyces* (*Actinobacteria*), *Pseudomonas* sp. (*Proteobacteria*) и азотфикссирующие *Azobacter* (*Proteobacteria*). Отдельно встречались виды, вырабатывающие соединения, стимулирующие рост растений и способствующие лучшей биодеградации отработанного субстрата.

В качестве источников питания для вермикультуры используют различные субстраты и их комбинации с другими материалами. Отходами для вермикомпостирования являются отходы сельского хозяйства, либо от твердых коммунальных отходов, либо от отходов промышленности [8–13]. Наиболее часто для вермикомпостирования используют именно отходы сельского хозяйства из-за их высокой питательности, но кроме них черви способны перерабатывать отходы промышленности (например: угольная зола, жом, пивная дробина, шламы бумажной и хлебопекарной промышленности и т. д.) [12, 13]. У данного направления есть перспектива в будущем, поскольку оно позволяет не только переработать два разных вида отходов, но и получить продукты с добавленной стоимостью [13].

Однако для правильного развития вермикультуры в материале должны соблюдаться такие параметры, как температура, влажность, pH, соотношение C : N [14]:

1) температура: влияние температуры неоспоримо не только для дождевых червей, но и для обитающих в отработанном субстрате микроорганизмов, которые активизируются при определенной температуре и, соответственно, участвуют в его полном разложении [11];

2) уровень pH: дождевые черви предпочитают нейтральную среду ( $\text{pH} = 6,0\text{--}7,0$ ), поскольку величины кислотности выше или ниже 7,0 не способствуют их развитию, а соответственно, и размножению в субстрате [14];

3) влажность: из-за своей физиологии черви нуждаются во влажной среде обитания, поскольку без дыхания черви не смогут развиваться и давать потомство;

4) соотношение C : N: данный показатель необходим для контроля бактериальной активности в субстрате. Высокое соотношение C : N приводит к снижению бактериальной активности из-за нехватки азота, который участвует в синтезе белков и аминокислот. Низкое соотношение C : N также не желательно, поскольку приводит к высоким концентрациям аммиака, который может быть губителен для червей. Процесс вермикомпостирования будет протекать должным образом, если соотношение C : N составляет около 25–30 и будет уменьшаться в ходе процесса. Углерод уменьшается, потому что гетеротрофные бактерии используют органический субстрат в качестве источника электронов, после чего углерод окисляется и высвобождается в атмосферу в виде  $\text{CO}_2$ . Для микроорганизмов азот в виде аммиака также может быть использован и преобразован в нитриты и нитраты, которые потом могут восстанавливаться, а выделившийся азот уходит в виде  $\text{N}_2$ .

Вермикомпостирование представляет собой сложную комбинацию биохимических процессов, происходящих с помощью дождевых червей и микроорганизмов для переработки образующихся отходов и превращающих их в новый продукт. Конечный продукт жизнедеятельности червей – вермикомпост, представляющий собой их экскременты (копролиты), обогащенные гуминовыми веществами, биологически активными соединениями, гормонами и т. д. [12–14]. Если рассматривать изменения, которые претерпел субстрат после вермипереработки, то с физической точки зрения вермикомпост обладает высокой водоудерживающей способностью и пористостью; оптимальная влажность находится в пределах 60–80 % (поскольку высокая влажность способствует лучшему разложению твердых отходов). Наблюдается снижение насыпной плотности, размер частиц варьируется в зависимости от природы субстратов: чем больше размер частиц, тем меньше удельная поверхность и тем меньше она доступна для деятельности микроорганизмов.

С химической точки зрения, в вермикомпосте происходит снижение pH за счет образования органических кислот и выделения  $\text{CO}_2$  во время разложения [15]. Как правило, на начальном этапе вермикомпостирования pH увеличивается из-за образования азотистых продуктов в субстрате, а после уменьшается на конечном этапе из-за нитрификации и образования органических кислот и улетучивания аммиака. Показатель pH является важным фактором, поскольку характеризует не только активности микроорганизмов, но и доступность питательных веществ. Низкий показатель pH характеризует высокую доступность макроэлементов и меньшую доступность микроэлементов, в случае высокого показателя pH – все наоборот. Нейтральная среда гарантирует доступность макро- и микроэлементов для правильного роста и развития вермикультуры. Кроме pH снижается общий органический углерод (TOC), что обусловлено потреблением органики дождевыми червями в качестве источника энергии и потерей в виде углекислого газа через дыхание. Наблюдается повышение емкости катионного обмена (ЕКО) во время вермикомпостирования, что связано с накоплением карбоксильных и фенольных групп при процессе гумификации.

С агрономической точки зрения, в вермикомпосте увеличивается содержание фосфора из-за активности фосфатомобилизирующих бактерий. Повышается концентрация азота, калия, натрия, кальция,

магния, серы. Общая концентрация азота увеличивается из-за минерализации, полисахаридов, конечных азотистых продуктов, гормонов, вырабатываемых дождевыми червями [14, 15]. Наблюдается пониженная концентрация тяжелых металлов, что обусловлено образованием металлокомплекса и аккумуляцией в тканях дождевых червей. После переработки полученный вермикомпост содержит высокий процент гумуса. Гуминовая кислота, присутствующая в гумусе, помогает растениям эффективнее извлекать питательные вещества из почвы, стимулирует рост побегов и корней, помогает преодолеть различные стрессы и участвует в профилактике вредителей (таких как нематоды, фитопатогенные бактерии и грибки) и некоторых насекомых [13]. В сравнении с микробиологическим компостированием, вермикомпостиование как процесс имеет ряд преимуществ. Вермикомпостиование – в первую очередь мезофильный процесс, в котором участвуют дождевые черви и живущие в них микроорганизмы, которые активны при температуре от 10 °C до 28 °C (имеется в виду не температура окружающей среды, а температура внутри органического материала). Процесс происходит в разы быстрее, чем компостирование, поскольку почвенный материал проходит через кишечник дождевого червя, происходит его трансформация, в результате чего полученные отходы дождевых червей (копролиты) обладают высокой микробной, стимулирующей и антибактериальной активностью для растений [12–14].

Кроме биомассы червей и вермикомпоста посредством вермикомпостиования можно получить и другие продукты. Вермимука представляет собой кормовой препарат, состоящий из переработанной биомассы дождевых червей, перетертых в муку. Это богатый источник животного белка, незаменимых аминокислот, жиров, витаминов и минералов, который найдет применение в животноводстве и рыболовном хозяйстве [14]. Другим примером может служить вермикомпостный чай, представляющий собой экстракт из вермикомпоста, настоящий в высокоаэрированной воде. Препарат кроме высокого содержания полезных элементов также содержит аэробные бактерии и актиномицеты, которые помогают обогащать почву и подавлять различные болезни растений. Использование вермичая в качестве удобрений поможет улучшить структуру почвы, ускорить созревание саженцев культурных растений и т. д. [16]. Однако несмотря на многочисленные исследования, посвященные вермикомпостиированию, все еще существуют пробелы в знаниях, которые могли бы помочь максимально раскрыть потенциал его применения. Одним из таких вопросов является детальное изучение состава бактериальных сообществ, обитающих не только в субстрате, но и в кишечнике самих червей. Процесс разложения происходит в течение определенного периода времени и может быть разделен на несколько фаз, в которых происходят изменения в составе микробного сообщества. Исследование в данной области не только позволило бы лучше понять синергию между дождевыми червями и микроорганизмами, но и использовать эти знания для определения свойств конечного продукта. Еще один вопрос: биодоступность тяжелых металлов и их накопление. Согласно литературным источникам, вермикопост влияет на биодоступность и подвижность тяжелых металлов в почве, что делает возможным его использование в фиторемедиации, тем самым позволяя растениям увеличивать накопление определенных металлов, которых не хватает в почвах. Один из примеров – недостаток цинка в почвах стран Азии. Цинк является важным элементом для всех живых организмов (у растений он входит в состав различных ферментов, участвует в образовании ростовых веществ) [18]. В Индии почвы с дефицитом цинка могут вызывать серьезные проблемы со здоровьем у населения, такие как снижение иммунитета, заболевания кожи, пищеварения и т. д. Ученые проводили исследования по обогащению почвы цинком с целью увеличения его концентрации и накопления в почвах, на которых выращивают сельскохозяйственные культуры, а также удовлетворения потребности людей в данном элементе. Кроме цинка это может касаться и других металлов, например железа. Детальное изучение данного процесса в вермикомпосте может найти применение в природоохранной деятельности и использоваться для озеленения территорий [19].

Выбор использования ОГС в качестве источника питания для вермикультуры объясняется наличием нейтрального pH, необходимым соотношением C : N, достигаемым при приготовлении субстрата, и высоким содержанием питательных веществ. Для проведения исследований вермикультуру червей эпигиеков *Eisenia fetida* вносили в ОГС от выращивания шампиньонов, после чего через определенные промежутки времени отбирали пробы для проведения дальнейших опытов, фиксировали состояние ОГС и червей. Процесс вермикомпостиирования контролировали по таким показателям, как общая численность (количество червей), общий вес, длина особей (см. рис. 1).

На выходе полученный вермикомпост приобретал однородную структуру, черный цвет и не имел запаха. Согласно рис. 1, численность особей в начале опыта значительно уменьшалась, однако после 14 суток стабилизировалась и либо не изменялась до конца проведения эксперимента, либо увеличивалась, что можно объяснить полной адаптацией червей к исследуемому субстрату. Примечательно, что изменение численности произошло при внесении добавки в ОГС. Общая биомасса червей до вермикомпостиирования и после значительно отличалась, поскольку питательные вещества, содержащиеся в отработанном субстрате, по мере переработки их червями истощались. До вермикомпостиирования общая биомасса составляла от 0,3 до 1,7 г; после компостирования – от 0,4 до 1,09 г. Наибольшая длина особей наблюдалась в ОГС до вермикомпостиирования (от 3 до 5 см), в отличие от других объектов. В ОГС после компостирования и с добавлением добавки длина червей варьировалась от 2,1 до 3,1 см соответственно.

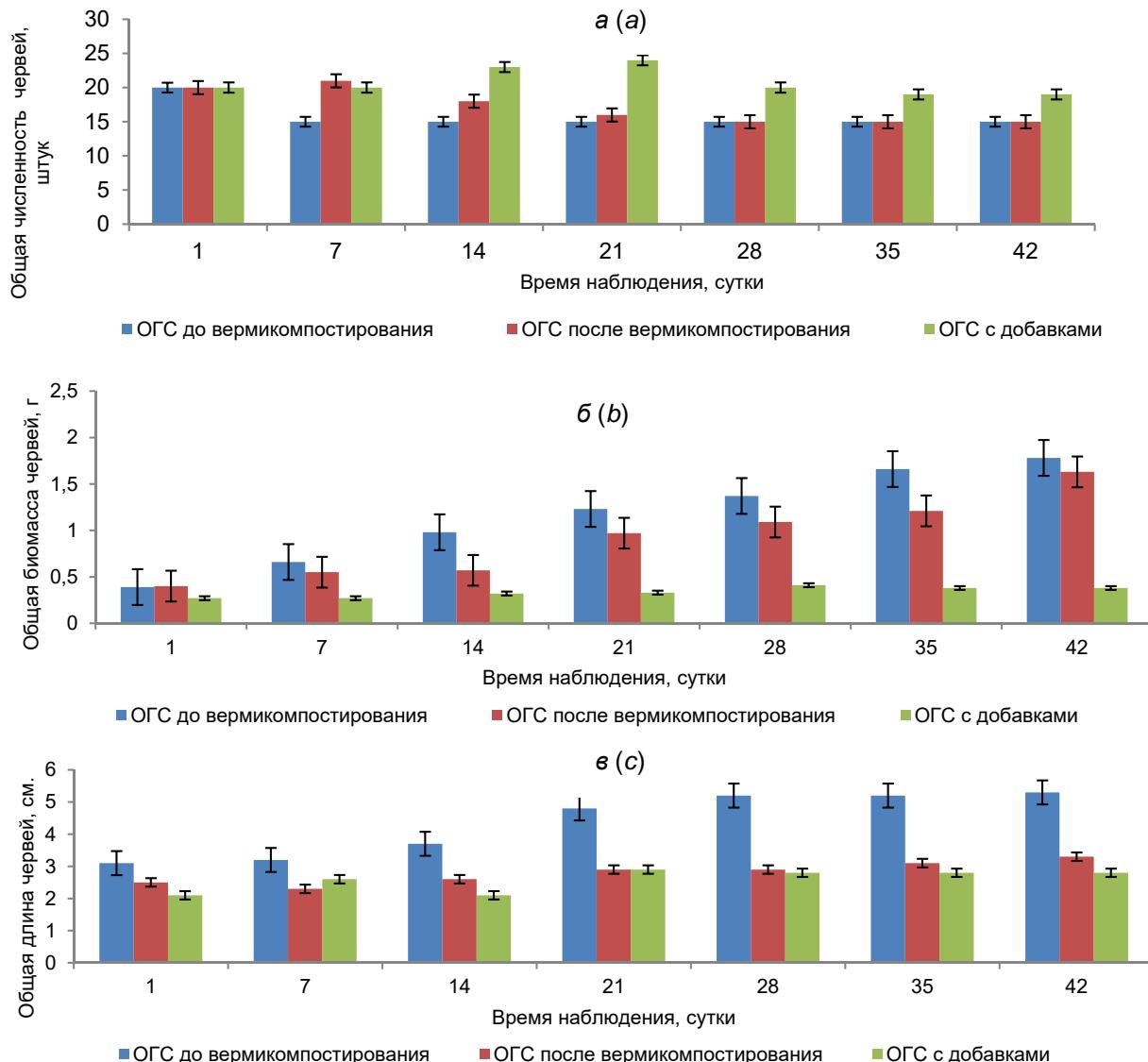


Рис. 1. Динамика изменения общих показателей червей во время вермикомпостирования:  
а – численность особей; б – биомасса особей; в – длина особей

Fig. 1. Dynamics of change in general indicators of worms during vermicomposting:  
a – number of individuals; b – total weight; c – length of individuals

**Фитотоксические исследования.** Фитотестирование как метод оценки почв используется издавна для определения качества семян, плодородия почв сельхозугодий, в биомедицинских исследованиях и относительно недавно – в природоохранной сфере для оценки экологического качества природных сред (вод, почв). Для проведения опыта готовили вытяжки из ОГС, на которых высевали семена тест-культуры (редька масличная) и инкубировали при температуре 23–24 °C. Оценку результатов исследований проводили на 3-и сутки по таким показателям, как энергия прорастания семян, длина побегов и корней, биомасса (см. таблицу). На основании имеющихся показателей рассчитывали индекс токсичности (ИТФ<sub>общ</sub>) для определения класса опасности:

$$\text{ИТФ}_{\text{общ}} = \frac{T_1 / T_{K_1} + T_2 / T_{K_2} + T_3 / T_{K_3}}{3},$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  – значения опыта первого (например, длина корневой части), второго и третьего показателей соответственно,  $T_{K_1}$ ,  $T_{K_2}$  и  $T_{K_3}$  – значения контроля первого, второго и третьего показателей соответственно.

### Результаты фитотоксических исследований с отработанным грибным субстратом

#### Results of phytotoxic studies with a spent fungal substrate

Объект	Длина, см		Энергия прорастания, %	Биомасса надземной части, г	ИТФ			Класс токсичности (ИТФ <sub>общ</sub> )
	корень	побеги			по корешковой части	по наземной части	по биомассе	
Контроль	1,73	0,85	80	1,101	—	—	—	—
ОГС до вермикомпостирования	2,305	0,91	85	1,136	1,33	1,07	1,101	V
ОГС после вермикомпостирования	2,52	0,89	90	1,12	1,45	1,04	1,02	VI
ОГС с добавками	2,65	0,84	90	1,211	1,53	0,98	1,10	VI

Примечание: VI класс – ИТФ > 1,10 – фактор, оказывает стимулирующее действие на тест-объект; V класс – ИТФ = 0,91–1,10 – фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объекта, т. е. величина тест-функции находится на уровне контроля; IV класс – ИТФ = 0,71–0,90 – низкая токсичность; III класс – ИТФ = 0,50–0,70 – средняя токсичность; II класс – ИТФ < 0,50 – высокая токсичность фактора; I класс – сверхвысокая токсичность, вызывает гибель тест-объекта.

На основе фитотоксических исследований установлено, что ОГС до вермикомпостирования относится к V классу опасности (т. е. фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объекта), а ОГС после вермикомпостирования, как с добавками, так и без них, – к VI классу опасности (т. е. фактор оказывает стимулирующее действие на тест-объект). Полученные результаты свидетельствуют, что переработанный ОГС вермикультурой, не только не проявляет токсическую активность в отношении растений, но и оказывает стимулирующее действие, что согласуется с литературными данными о действии на растения [19].

**Вегетационные опыты.** Оценку результатов проводили на 14-е сутки по таким показателям, как энергия прорастания семян, длина побегов и корней, биомасса надземной части растений. Результаты экспериментов представлены на рис. 2–4, из которых видно, как происходят изменения ОГС до и после вермикомпостирования. Энергия прорастания для всех образцов составила 80 % и выше. В образцах с ОГС до и после вермикомпостирования установлено преобладание длины корней над побегами – в случае овса. И наоборот, преобладание длины побегов над корнями – в случае редьки и газонной травы. Доминирование длины побегов над корнями может возникать как адаптивная реакция на конкуренцию с другими растениями за свет. Доминирование длины корней над побегами можно объяснить их увеличением с целью лучшего поглощения веществ и воды из отработанного субстрата. Причем происходило не только увеличение главного корня, но и образование мелких придаточных корней. Наибольшая длина корней и побегов отмечалась для ОГС после вермикомпостирования (в среднем для корней от 4,1 до 5,65 (овес); от 2,9 до 5,1 (редька, газонная трава), побегов – от 3,2 до 4,7 (овес); от 4,1 до 5,4 (редька, газонная трава)). Для ОГС до вермикомпостирования результаты были ниже: для корней – от 2,9 до 4,2 (овес); побегов – от 2,93 до 4,0 (овес); от 2,9 до 3,78 (редька, газонная трава). Биомасса надземной части во все образцах по мере переработки отхода незначительно увеличивалась.

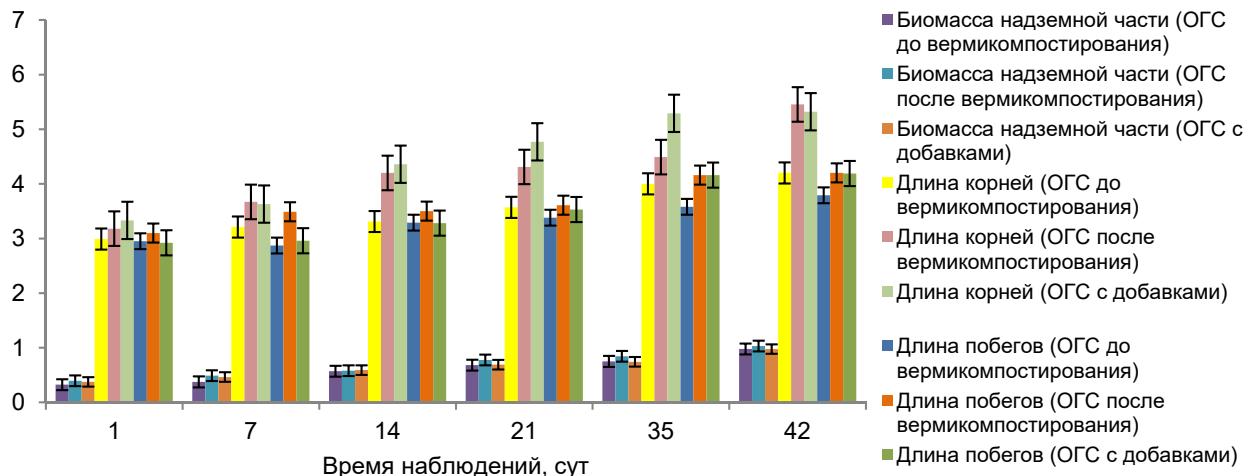


Рис. 2. Результаты вегетационных опытов с ОГС (редька)

Fig. 2. Results of vegetation experiments with SMS (radish)

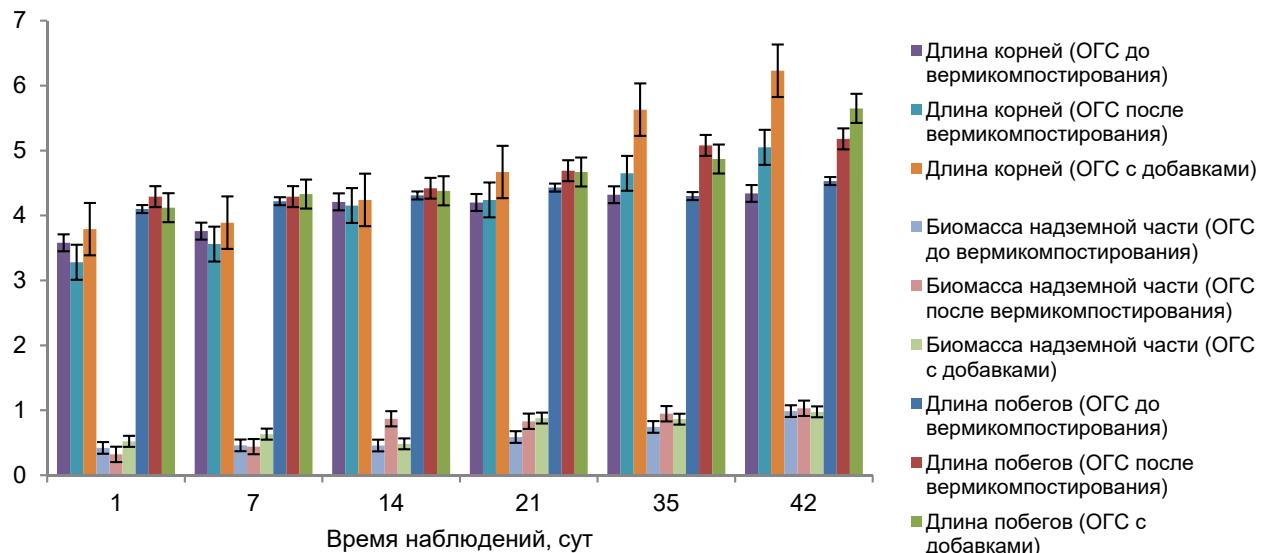


Рис. 3. Результаты вегетационных опытов с ОГС (овес)

Fig. 3. Results of vegetation experiments with SMS (oat)

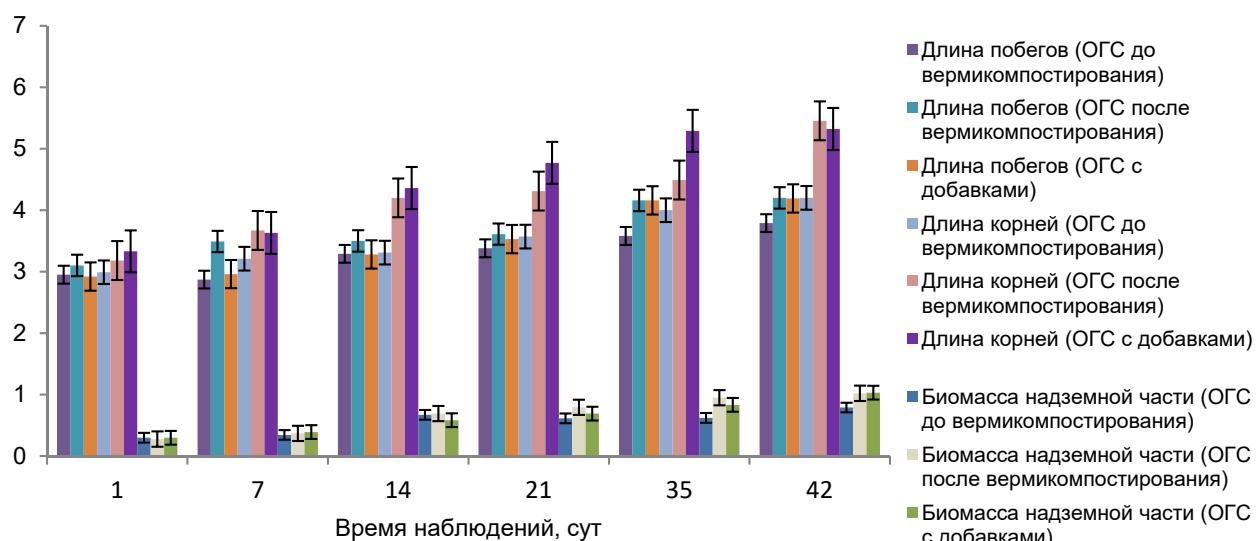


Рис. 4. Результаты вегетационных опытов с ОГС (газонная трава)

Fig. 4. Results of vegetation experiments with SMS (lawn grass)

**Заключение.** Вермикомпостирование имеет большой потенциал как направление для переработки широкого спектра отходов, производимых в различных областях деятельности человека, и получения высококачественных продуктов, которые могут иметь многоцелевое применение. Установлено, что ОГС как отход производства поддается переработке и на выходе можно получить новый продукт (вермикомпост) с новыми характеристиками. Для ОГС, переработанного вермикультурой, наблюдается стимулирующий эффект по отношению к растениям, который по мере переработки только усиливается. Кроме получения основных конечных продуктов переработки (вермикомпост и биомассы червей) есть возможность получения вермимуки как кормового белка или вермичая как удобрения в жидком виде. Есть направление, в котором ОГС смешивают с неперерабатываемыми отходами промышленности и получают сырье для дальнейшего разведения червей (отходы энергетических, целлюлозно-бумажных, пищевых предприятий и др.). На выходе полученный вермикомпост способен повышать урожайность почвы, улучшать плодородие почвы, физико-химические и биологические показатели в материале, обеспечивать получение скороспелой, высококачественной и экологически чистой продукции в экстремальных условиях.

### Список использованных источников

1. Reno, J. Waste and Waste Management / J. Reno // Annual review of anthropology. – 2015. – Vol. 44. – P. 557–572.
2. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): a review / Yoong Kit Leong [ets.] // Bioresource Technology. – 2022. – Vol. 344. – P. 1–10.
3. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate / F. Hanafi [et al.] // J. of Material cycles and Waste Management. – 2018. – Vol. 20, № 8. – P. 1383–1396.
4. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
5. Максимова, С. Л. Развитие технологии вермикомпостирования и вермикультивирования в Беларуси / С. Л. Максимова, Т. М. Шабанова, Ю. Ф. Мухин // Вестник Полесского гос. ун-та. Сер. природовед. наук. – 2008. – С. 44–47.
6. Kumar, S. Integrated Waste Management / S. Kumar. – India : National Environmental Engineering Research Institute, 2011. – Vol. II. – 484 p.
7. Титов, И. Н. Дождевые черви : руководство по вермикультуре : в 2 ч. / И. Н. Титов. – Иркутск : МФК Точка опоры, 2012. – Ч. 1 : Компостные черви. – 424 с.
8. Adhikary, S. Vermicompost, the story of organic gold : A review / S. Adhikary // Agricultural Sciences. – 2012. – Vol. 3, № 7. – P. 1–13.
9. Ahmad, A. Vermicomposting by bio-recycling of animal and plant waste : a review on the miracle of nature / A. Ahmad [et al.] // Journal of Innovative Sciences. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 175–187.
10. Kertesz, M. A. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of Agaricus bisporus and other commercial mushrooms / M. A. Kertesz, M. Thai // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2018. – Vol. 102, № 4. – P. 1639–1650.
11. Лысак, В. В. Микробиология. Практикум : пособие / В. В. Лысак, Р. А. Желдакова, О. В. Фомина. – Минск : Изд-во БГУ, 2015. – 115 с.
12. Bhattacharya, S. S. Effect of vermicomposting on the transformation of some trace elements in fly ash / S. S. Bhattacharya, G. N. Chattopadhyay // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2006. – Vol. 75. – P. 223–231.
13. Comparing the nutrient changes, heavy metals, and genotoxicity assessment before and after vermicomposting of thermal fly ash using Eisenia fetida / B. Sohal [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – Vol. 28. – P. 48154–48170.
14. Vermicomposting – facts, benefits and knowledge gaps / A. Vuković [et al.] // Agronomy. – 2021. – Vol. 11, № 10. – P. 1–20.
15. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, *Bouché*) and the effects on seedling growth / R. M. Atiyeh [et al.] // Pedobiologia. – 2000. – Vol. 44, № 6. – P. 709–724.
16. Scheuerell, S. Compost tea: principles and prospects for plant disease control / S. Scheuerell, W. Mahaffee // Compost science and utilization. – 2002. – Vol. 10, № 4. – P. 313–338.
17. Sengupta, S. Enrichment of vermicompost for improving soil quality and ensuring Zn and Fe bioavailability through rice grain / S. Sengupta, S. Mukherjee, S. Halder // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. – 2020. – Vol. 9. – P. 246–254.
18. Юрин, В. М. Минеральное питание растений : учеб. пособие / В. М. Юрин, С. Н. Найдун. – Минск : Изд-во БГУ, 2004. – 234 с.
19. Nik Nor Izyan, N. A. Potential of Spent Mushroom Substrate in Vermicomposting / N. A. Nik Norlzyan, A. A. Jamaludin, N. Z. Mahmood // Dynamic Soil, Dynamic Plant. – Vol. 3, № 2. – P. 87–90.

### References

1. Reno J. Waste and Waste Management. *Annual review of anthropology*, 2015, vol. 44, pp. 557–572.
2. Leong Y. K., Ma T. W., Chang J. S., Yang F. C. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): a review. *Bioresource Technology*, 2022, vol. 344, pp. 1–10.
3. Hanafi F., e. a. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate. *J. of Material cycles and Waste Management*, 2018, vol. 20, no. 8, pp. 1383–1396.
4. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svojstva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and Technology Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
5. Maksimova S. L., Shabanova T. M., Muhin Yu. F. *Razvitiye tekhnologii vermikompostirovaniya i vermikul'tivirovaniya v Belarуси* [Development of vermicomposting and vermicultivation technology in Belarus]. *Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya prirodovedcheskikh nauk = Bulletin of Polesie State University. Series of Natural Sciences*, 2008, pp. 44–47. (in Russian)
6. Kumar, S. Integrated Waste Management. Vol. II. India, National Environmental Engineering Research Institute, 2011, 484 p.
7. Titov I. N. *Dozhdevye chervi. Rukovodstvo po vermikul'ture v 2 chastyah. Chast' 1 Kompostnye chervi* [Earthworms. Vermiculture guide in 2 parts. Part 1 Compost worms]. Irkutsk, 2012, 424 p. (in Russian)
8. Adhikary S. Vermicompost, the story of organic gold: a review. *Agricultural Sciences*, 2012, vol. 3, no. 7, pp. 1–13.
9. Ahmad A., Aslam Z., Bellitürk K., Ullah E., Raza A., Asif M. Vermicomposting by bio-recycling of animal and plant waste : a review on the miracle of nature. *J. of Innovative Sci.*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 175–187.

10. Kertesz M. A., Thai M. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, vol. 102, no. 4, pp. 1639–1650.
11. Lysak V. V., Zheldakova R. A., Fomina O. V. *Mikrobiologiya. Praktikum* [Microbiology. Workshop]. Minsk, 2015, 115 p. (in Russian)
12. Bhattacharya S. S., Chattopadhyay G. N. Effect of vermicomposting on the transformation of some trace elements in fly ash. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, vol. 75, pp. 223–231.
13. Sohal B., Singh S., Kumar Singh S. I., Bhat S. A., Kaur J., Singh J., Vig A. P. Comparing the nutrient changes, heavy metals, and genotoxicity assessment before and after vermicomposting of thermal fly ash using *Eisenia fetida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 48154–48170.
14. Vuković A., Velki M., Ečimović S., Vuković R., Čamagajevac I. Š., Lončarić Z. Vermicomposting – Facts, Benefits and Knowledge Gaps. *Agronomy*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 1–20.
15. Atiyeh R. M., Domínguez J., Subler S., Edwards C. A. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia*, 2000, vol. 44, no. 6, pp. 709–724.
16. Scheuerell S., Mahaffee W. Compost tea: principles and prospects for plant disease control. *Compost science and utilization*, 2002, vol. 10, no. 4, pp. 313–338.
17. Sengupta S., Mukherjee S., Halder S. Enrichment of vermicompost for improving soil quality and ensuring Zn and Fe bioavailability through rice grain. *J. of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2020, vol. 9, pp. 246–254.
18. Yurin V. M., Najdun S. N. *Mineral'noe pitanie rastenij. Uchebnoe posobie* [Mineral nutrition of plants. Study guide]. Minsk, 2004, 234 p. (in Russian)
19. Nik Nor Izyan N. A., Jamaludin A. A., Mahmood N. Z. Potential of Spent Mushroom Substrate in Vermicomposting. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, vol. 3, no. 2, pp. 87–90.

#### Информация об авторах

**Янута Григорий Григорьевич** – кандидат биологических наук, доцент, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanutag@rumbler.ru

**Шелоник Мария Александровна** – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

#### Information about authors

**Grigoriy G. Yanuta** – Ph. D. (Biological), Assistant Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanutag@rumbler.ru

**Mariya A. Shelonik** – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

## ЮБИЛЕЙ JUBILEE

### Анатолий Викторович Кудельский К 90-летию со дня рождения Anatoliy Viktorovich Kudelskiy To the 90<sup>th</sup> of the birth

16 сентября 2024 г. исполнилось 90 лет лауреату Государственной премии Республики Беларусь (1998), доктору геолого-минералогических наук, профессору, члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси Анатолию Викторовичу Кудельскому – известному гидрогеологу, крупному специалисту в области региональной и нефтегазовой гидрогеологии, геохимии подземных вод и экологии.

Закончив в 1958 г. Днепропетровский горный институт и получив специальность горного инженера-гидрогеолога, А. В. Кудельский в течение 10 лет работал в Туркмении, в Южно-Каракумской геологической экспедиции, где занимался изучением подземных вод горно-пустынных территорий Копет-Дага и прилегающих районов Кара-Кумов по программе гидрогеологических съемок масштабов 1 : 200 000 и 1 : 100 000. Составленные им гидрогеологические карты Западного Копет-Дага сыграли важную роль в изучении и экономическом развитии Восточного Закаспия.



Мелиоративная гидрогеология, гидрогеология горных стран, сельскохозяйственное и коммунальное водоснабжение, формирование пресных и минеральных вод, роль подземных вод в образовании нефти и газа, рудных и нерудных полезных ископаемых – вот далеко не полный перечень исследований Анатолия Викторовича в Туркмении.

В этот же период А. В. Кудельский развивал концепцию гидродинамической автономности горно-складчатых сооружений относительно смежных с ними межгорных и предгорных депрессий, основанную на идеях Н. Н. Игнатовича и А. М. Овчинникова. В работах Анатолия Викторовича концепция приобрела контуры и глубину теории, сыгравшей важную роль в пересмотре постулата региональной гидрогеологии, касающегося распределения областей питания и разгрузки водоносных горизонтов и комплексов по профилю горно-складчатые сооружения – предгорные прогибы.

С 1968 г. научная и научно-производственная деятельность А. В. Кудельского неразрывно связана с Беларусью, куда он переехал по приглашению академиков Г. В. Богомолова и К. И. Лукашева. Первоначально в составе Геохимической лаборатории Академии наук БССР, а с 1971 г. в составе академического Института геохимии и геофизики Анатолий Викторович занимался изучением региональной гидрогеологии страны, геохимии и динамики подземных вод и рассолов, минеральных вод и газового режима Припятского нефтегазоносного бассейна, активно оппонировал гидрогеологически необоснованным широкомасштабным осушительным мелиорациям Полесья.

По каждому из этих направлений непосредственно А. В. Кудельским и под его руководством созданы крупные монографические обобщения, содержащие как фундаментальные разработки, так и огромные массивы результатов многолетних исследований геологической службы Беларуси, самого ученого и его коллег.

Огромное внимание Анатолий Викторович уделяет изучению региональной гидрогеологии и пресных подземных вод – основного источника хозяйственно-питьевого обеспечения Беларуси. А. В. Кудельским и сотрудниками возглавляемой им лаборатории создается база данных по химическому составу подземных вод, разрабатывается стратегия сохранения их высокого качества, впервые составлены среднемасштабные гидрохимические карты четвертичных и дочетвертичных отложений Беларуси. Исследования Анатолия Викторовича по гидрогеологии Беларуси в части полученных результатов по пресным, минерализованным водам, рассолам, в том числе по йодо-бромной тематике,

гидрогеохимическим критериям оценки перспектив нефтегазоносности, газовому режиму девонских отложений Припятского прогиба и другие реализованные ученым задачи явились надежной основой для исследования недр Беларуси в текущем и перспективном направлениях.

Фундаментальные научные исследования А. В. Кудельского органически сочетаются с практическим применением их результатов в соответствии с запросами народно-хозяйственного комплекса страны. Анатолием Викторовичем и его коллегами активно внедряется в производство научно обоснованная концепция подземного захоронения жидких и вязко-пластичных отходов буровых работ в Припятском прогибе, разрабатывается методика и в течение многих лет проводится экологический мониторинг на подземных газовых хранилищах Беларуси.

После катастрофы на Чернобыльской АЭС А. В. Кудельский и сотрудники возглавляемой им лаборатории гидрогеологии занимались проблемами радиоэкологии, миграции радионуклидов и радиационного состояния поверхностных и подземных вод загрязненных территорий юго-восточной Беларуси. Начиная с 1993 г. и в последующие годы Анатолий Викторович активно сотрудничал с учеными Великобритании, Италии, Германии, Португалии, Нидерландов, Франции, Украины и России, являясь научным руководителем и координатором белорусской части международных проектов, касающихся миграции и моделирования поведения радионуклидов в почвенном субстрате и водных экосистемах в связи с аварией на Чернобыльской АЭС.

В 1993–1997 гг. А. В. Кудельский представлял Беларусь в международных разработках по проекту Pilot-study NATO/NACC/CCMS «Cross-border Environmental problems emanating defencerelated installations and activities» и участвовал в выездных совещаниях в Германии (1993), Турции (1994), Франции (1994), Италии (1996), Исландии (1996), Великобритании (1997) и Польше (1997).

Результаты исследований по проекту позволили оценить масштабы экологических разрушений в результате двух мировых войн, характер и объем загрязнения на территории бывших военных баз, ставить и решать (Германия и другие страны) проблему регламентации экологического ущерба от деятельности военных формирований в мирное время и необходимости работ над проектом Международной концепции научно-экологического регулирования военной деятельности в эти же периоды.

В 2005 г. Анатолий Викторович представлял Республику Беларусь в качестве эксперта-наблюдателя в работе выездной миссии МАГАТЭ по обсуждению проекта наземного хранилищаadioактивных отходов Игналинской АЭС (Литва, Вильнюс-Игналина). Показательный пример опережающих гидрогеологических исследований ученых возглавляемой А. В. Кудельским лаборатории в районах строительства особо важных инженерных объектов хорошо просматривается при сооружении Белорусской АЭС на территории Островецкого региона. Детальный анализ и открытое обсуждение проблемы в дальнейшем оказались полезными при подготовке и проведении им и его сотрудниками гидрогеологических исследований в пределах Островецкой площадки планируемой для строительства Белорусской АЭС (2009) и последующих научно-прикладных исследований, реализуемых в настоящий период (2024) для выбора площадок под проектирование пункта захоронения радиоактивных отходов.

Профирирующая тематика в исследованиях Анатолия Викторовича и сотрудников лаборатории гидрогеологии и гидроэкологии ориентирована на изучение региональной гидрогеологии Беларуси, происхождения и геохимии пресных подземных вод питьевого регистра.

Значительный интерес мировой геологической общественности вызвали экспертные оценки А. В. Кудельским природы ажиотажа вокруг проблемы сланцевого газа. В результате геолого-геохимических исследований Анатолий Викторович пришел к заключению, что мировой газосланцевый бум не имеет под собой оснований, а высокий прирост газодобычи в США в последние годы связан не с эксплуатацией так называемых месторождений сланцевого газа, а с освоением ранее законсервированных месторождений свободного газа и (или) с перехватом газопотоков из глубокопогруженных зон современного нефтегазообразования и нефтегазовых залежей.

За исследование проблем нефтегазоносности верхнепротерозойских и палеозойских комплексов Беларуси и Сибири А. В. Кудельскому вместе с группой белорусских и российских ученых присуждена Межакадемическая (Национальная академия наук Беларуси и Сибирское отделение Российской академии наук) премия имени академика В. Н. Коптюга (2004).

Пристальное внимание ученым уделяет развитию гидрогеологии в Беларуси и подготовке научных кадров. На протяжении ряда лет он читал лекции в Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины, Белорусском государственном университете, Белорусском национальном техническом университете и других учреждениях высшего образования. Им подготовлено 11 кандидатов наук. Анатолий Викторович неизменно занимал благожелательную и активную позицию по отношению к подготовке коллегами их докторских и кандидатских диссертаций.

Профессор А. В. Кудельский – талантливый пропагандист и популяризатор научных знаний. Его научно-популярные книги «Новеллы о воде» (1973), «Рассказы о воде: белорусские криницы» (1981), «Вода жизни нашей» (1992), а также социально-экологическая постчернобыльская публицистика (журналы «Нёман», «Полымя», «Беларуская думка» и другие издания, 1990–2003) завоевали признание широкой аудитории читателей, сыграли значительную роль в формировании общественного самосознания и несомненно способствовали росту популярности нашей страны на международной арене.

Анатолий Викторович является автором более 530 опубликованных работ, в том числе 25 монографий и книг.

За выдающиеся научные достижения А. В. Кудельский награжден Государственной премией Республики Беларусь (1998), Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь (2010), Почетной грамотой Национальной академии наук Беларусь (2014, 2019), Памятным знаком «У гонар 90-годдзя Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (2018), нагрудным знаком отличия имени В. М. Игнатовского Национальной академии наук Беларусь (2022).

Широта мышления, эрудиция, увлеченность наукой, способность видеть главное в сложных научных проблемах и принципиальность привлекают к Анатолию Викторовичу творческих людей. Его отличают оптимизм, доброжелательность и внимание к коллегам, готовность поддержать новые идеи и преданных этим идеям ученых. Жизнелюбие и юмор сочетаются в нем с редкой трудоспособностью и высокими человеческими качествами. А. В. Кудельский по праву является лидером белорусской геолого-гидрогеологической науки, пользуется широкой известностью и заслуженным авторитетом, как в нашей стране, так и далеко за ее пределами. Коллеги поздравляют Анатolia Викторовича Кудельского с юбилеем, желают ему успехов, здоровья и долголетия!

**С. А. Лысенко, Р. Г. Гарецкий, А. В. Матвеев,  
А. А. Махнач, Я. Г. Грибик, В. И. Пашкевич,  
Г. А. Камышенко, В. С. Хомич**

**ХРОНИКА**  
**CHRONICS**

**V Международная научно-практическая конференция  
«Природная среда Антарктики: современные методы исследования  
с использованием данных дистанционного зондирования Земли»**

**V International Scientific and Practical Conference  
"The Natural environment of Antarctica: modern methods of research  
using remotely sensed data of the Earth"**

В период с 25 по 27 сентября 2024 г. на базе Государственного природоохранного учреждения «Национальный парк «Беловежская пуща» (аг. Каменюки, Каменецкий район, Брестская область) состоялась V Международная научно-практическая конференция «Природная среда Антарктики: современные методы исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли».

В мероприятии приняли участие более 70 ученых и специалистов, представляющих 25 научных организаций из трех стран: Беларусь (Республиканский центр полярных исследований НАН Беларусь, Институт природопользования НАН Беларусь, Институт физики НАН Беларусь имени Б. И. Степанова, Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Научно-практический центр НАН Беларусь по биоресурсам, Институт микробиологии НАН Беларусь, Белорусский государственный университет (биологический факультет), Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларусь и др.), России (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета, Институт географии РАН, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, ВНИИОкеангеология, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Зоологический институт РАН и др.) и Индонезии (Университет Гаджа Мада).



Участники V Международной научно-практической конференции «Природная среда Антарктики». Аг. Каменюки. Национальный парк «Беловежская пуща». 25–27 сентября 2024 г.

Participants of the V International scientific and practical conference "Natural environment of the Antarctic". Agro-town Kamenyuki. National park "Belovezhskaya Pushcha". 25–27 September 2024

Торжественное открытие состоялось в конференц-зале Национального парка «Беловежская пуща». Гостей конференции приветствовали руководитель Республиканского центра полярных исследований В. А. Рыжиков и академик В. Ф. Логинов. Заместитель академика-секретаря Отделения химии и наук о Земле Национальной академии наук Беларусь В. Г. Левашкевич выступил с приветственным словом от Президиума Национальной академии наук Беларусь. С приветственным словом к участникам конференции также обратились начальник Белорусской антарктической экспедиции А. А. Гайдашов, начальник Российской антарктической экспедиции П. И. Лунев, начальник научного отдела Национального парка «Беловежская пуща» Д. И. Бернацкий, директор НИЦ мониторинга озоносферы БГУ, председатель Белорусского географического общества А. Е. Яротов. Затем были сделаны пленарные доклады. Первым выступил руководитель Республиканского центра полярных исследований В. А. Рыжиков с докладом «Об основных результатах экспедиционной деятельности Республики Беларусь в Антарктике». Многолетний руководитель Белорусских антарктических экспедиций А. А. Гайдашов обобщил итоги развития научной инфраструктуры и расширения географии исследований Республики Беларусь в Антарктике. Начальник Российской антарктической экспедиции П. И. Лунев представил результаты создания нового корпуса внутриконтинентальной станции «Восток» и основных направлений научных исследований с учетом выполненного обновления. Начальник отдела Логистического центра Российской антарктической экспедиции В. В. Лукин сделал доклад на тему устойчивости международной системы Договора об Антарктике на современном этапе. Академик В. Ф. Логинов выступил с докладом «Усиление потепления климата в полярных шапках и его возможные причины». Результаты исследований в области физики атмосферы и разработке белорусскими специалистами методов комплексного радиометрического и лидарного зондирования подытожил в своей презентации А. П. Чайковский.



**Выступление А. А. Гайдашова на пленарном заседании конференции.  
В президиуме слева направо: В. А. Рыжиков, П. И. Лунев, В. Ф. Логинов,  
В. Г. Левашкевич, Д. И. Бернацкий**

**A. A. Gaidashov's speech at the plenary session of the conference.  
In the presidium from left to right: V. A. Ryzhikov, P. I. Lunev, V. F. Loginov,  
V. G. Levashkevich, D. I. Bernatsky**

Интенсивная работа конференции продолжилась во второй день, 26 сентября: состоялись доклады в шести тематических секциях. Доклады на секции «Климатология. Гидрология» были посвящены исследованиям теплофизических свойств подстилающей поверхности (А. Г. Светашев, Б. В. Иванов), водного режима и течений (М. С. Молчанов, С. А. Правкин, Д. А. Смирнова, Д. И. Фрей), мониторингу опасных природных явлений (С. Д. Григорьева), потокам парниковых газов (А. И. Иващенко, А. В. Козачек). На секции «Физика атмосферы» были представлены доклады по изучению содержания в атмосфере озона (Т. В. Шлендер, А. Г. Светашев) и других отдельных компонентов (Н. С. Метельская, Е. А. Марчук), характеристикам атмосферного электрического поля (А. В. Франк-Каменецкий), валидации методов дистанционного зондирования Земли (Е. А. Илькевич). Отдельным блоком на профильной

секции были представлены результаты исследований свойств и процессов, происходящих в земной коре: в области сейсмики (А. Г. Аронов, А. А. Кодымов, К. В. Терещенко), геофизических свойств (А. В. Голынский, П. В. Шаблыко), геологического строения и процессов (В. М. Сергеева, П. В. Шаблыко, И. Г. Шоркунов). В секции «Биологические исследования» доклады были посвящены как отдельным группам биоты – водорослям (С. В. Смирнова, В. В. Лукин), мхам (Л. Е. Курбатова), лишайникам (М. П. Андреев), грибам (А. М. Тригубович, О. А. Иванов), ракообразным (В. В. Вежновец), птицам (Г. Утама), так и комплексным исследованиям сообществ живых организмов в пределах ландшафтов (И. С. Смирнов) Отдельным тематическим блоком шли выступления по микробиологии (В. Е. Мямин, А. Л. Панин, Л. Н. Валентович, Е. В. Охремчук, А. М. Тригубович, И. А. Кутузова). Результаты комплексных экологических исследований были представлены в докладах А. В. Долгих, А. В. Весман. Ряд докладов был посвящен использованию беспилотной техники в исследованиях Антарктиды (Е. В. Корзун, Д. А. Голынский). Отдельным блоком были представлены доклады по вопросам здоровья человека в условиях высоких широт и правовому регулированию деятельности в Антарктике (Н. С. Горюхова, Е. А. Луговая, Ю. Г. Хоменко, С. Н. Шаповалов). Отдельно стоит отметить демонстрации руководителем Белорусской антарктической экспедиции А. А. Гайдашовым трех фильмов, посвященных строительству Белорусской антарктической станции, внутриконтинентальным походам и научным исследованиям, проведенным в течение прошедших сезонов.



**Круглый стол по вопросам особо охраняемых территорий Антарктики.**  
**Слева направо:** П. И. Лунев, В. Н. Помелов, В. В. Лукин, С. Ю. Тарабенко,  
 А. А. Гайдашов, В. А. Рыжиков, Ю. Г. Гигиняк, В. Е. Мямин

**Round table on the issues of Antarctic specially protected areas.**  
**From left to right:** P. I. Lunev, V. N. Pomelov, V. V. Lukin, S. Yu. Tarasenko,  
 A. A. Gaidashov, B. A. Ryzhikov, Yu. H. Hihiniak, V. E. Miamin

В рамках конференции состоялся круглый стол, посвященный вопросам особо охраняемых территорий Антарктики, с участием руководителя Республиканского центра полярных исследований НАН Беларусь В. А. Рыжикова, начальников белорусской и российской антарктических экспедиций (А. А. Гайдашова, П. И. Лунева) и приглашенных специалистов (В. В. Лукина, В. Н. Помелова, С. Ю. Тарабенко, В. Е. Мямина, Ю. Г. Гигиняка).

Представленные на конференции научные доклады опубликованы в издании *Природная среда Антарктики : сборник материалов V Международной научно-практической конференции (25–27 сентября 2024 г.), аг. Каменюки, Национальный парк «Беловежская пуща» / редкол.: В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2024. – 335 с.*



**В. А. Рыжиков, О. А. Круковская**

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Природопользование» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию на белорусском или русском языках; шрифт – Arial, кегль – 10 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – одинарный. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

инициалы и фамилии авторов;

название статьи;

полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Затем метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен составлять 10–16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки, число которых не должно превышать 10. Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисуночные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – русском (белорусском) и английском.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитированная литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

7. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падзяка»), «Acknowledgements».

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), звание, должность, место работы с указанием адреса, e-mail (для оперативной связи указать телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке или присыпается по электронной почте в редакцию журнала – eco@nature-nas.by. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType.

### Правила оформления статьи:

параметры страницы – формат А4; поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см (**страницы не нумеровать!**);

текст набирается шрифтом Arial, кегль 10;

межстрочный интервал – одинарный;

абзацный отступ – 10 мм.

Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C<sup>2</sup>, C<sub>4</sub>) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать курсивом, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, C<sub>1</sub>) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word) после первого упоминания о них, а также даются в виде отдельных файлов в графическом формате (300 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статье, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно предоставлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде. **Таблицы** должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы. Следует **различать дефис «-» и тире «—»**. В тексте тире отделяется единичными пробелами, между цифрами и числами тире ставится без пробелов.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редакцией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редакции.

Материалы для публикации следует направлять по адресу: ул. Ф. Скорины, 10, комн. 202, редакция журнала «Природопользование», 220076, г. Минск, Республика Беларусь, либо по электронной почте: eco@nature-nas.by. Тел. для справок: +375 17 325 84 55.

**Научное издание**  
*Scientific publication*

**ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ**  
*NATURE MANAGEMENT*

**№ 2, 2024**

---

**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 20.12.2024.  
Format 60×90/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Ариал. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 22,1.  
Уч.-изд. л. 21,6.  
Тираж 100 экз.  
Заказ № 665.

Signed into print 20.12.2024.  
60×90/8 format. Office paper.  
Arial garniture. Digital print.  
Conditional printed sheets 22,1.  
Conditional edited sheets 21,6.  
Circulation 100 copies.  
Order No. 665.

Полиграфическое исполнение  
Республиканское унитарное предприятие  
«Информационно-вычислительный центр  
Министерства финансов  
Республики Беларусь».  
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014 г.  
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск

Polygraph execution  
Republican unitary enterprise  
«Information and Computer Centre  
of the Ministry of Finance  
of the Republic of Belarus».  
Press license no. 02330/89 of 3 March 2014.  
Kalvarijskaya Str. 17, 220004, Minsk