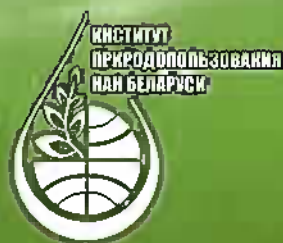


ISSN 2079-3928

Природо- пользование



1

2024

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»

Природопользование

2024. № 1

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

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

Хомич В. С. – доктор географических наук, доцент (*заместитель главного редактора*)
Томсон А. Э. – кандидат химических наук, доцент (*заместитель главного редактора*)
Высоченко А. В. – кандидат технических наук (*ответственный секретарь*)
Бровка Г. П. – доктор технических наук, доцент
Грибик Я. Г. – кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Жогло В. Г. – доктор геолого-минералогических наук, доцент
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук, доцент
Курзо Б. В. – доктор технических наук, доцент
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук, профессор
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор
Матвеев А. В. – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Струк М. И. – кандидат географических наук, доцент

Международный редакционный совет

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

Адрес

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



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

Nature Management

2024. № 1

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

Editor-in-Chief

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

Editorial Board

Valery Khomich – D. Sc. (Geography), Docent (*Associate Editor-in-Chief*)
Aleksey Tomson – Ph. D. (Chemistry), Docent (*Associate Editor-in-Chief*)
Anna Vysochenko – Ph. D. (Technical) (*Executive Secretary*)
Gennadiy Brovka – D. Sc. (Technical), Docent
Yaroslav Gribik – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Docent
Vasiliy Zhoglo – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Docent
Sergey Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor
Halina Kamyshenka – Ph. D. (Technical), Docent
Boris Kurzo – D. Sc. (Technical), Docent
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Professor
Vladimir Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor
Aleksey Matveev – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor
Mikhail Struk – Ph. D. (Geography), Docent

International Editorial Council

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

Address

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



СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

- Логинов В. Ф., Микуцкий В. С., Бровка Ю. А. Частотная структура многолетней изменчивости Атлантической мультидекадной и Северо-Атлантической осцилляций 5
Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A. Frequency structure of multiyear variability of the Atlantic Multidecadal and the North Atlantic Oscillations
- Лысенко С. А., Зайко П. О. Мезомасштабное гидродинамическое моделирование климата Гомельской области при облесении и повторном заболачивании земель: сравнение с оценками на основе данных дистанционного зондирования Земли 18
Lysenko S. A., Zaiko P. O. Mesoscale hydrodynamic climate modelling in Gomel region under reforestation and re-swamping scenarios: comparison with estimations based on remote sensing data
- Лысенко С. А., Зайко П. О. Геоинформационная система повышения оправдываемости гидродинамического прогноза погоды для территории Беларуси на основе данных дистанционного зондирования Земли и объективного анализа метеорологических полей 30
Lysenko S. A., Zaiko P. O. Geographic information system for hydrodynamic weather forecast accuracy increasing for Belarusian territory based on Earth remote sensing data and the objective analysis of meteorological fields
- Какарека С. В., Кокош Ю. Г., Кудревич М. А. Особенности химического состава атмосферных осадков в Минске в 2018–2022 гг. 41
Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. Features of the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk in 2018–2022
- Кириченко Л. А., Волчек А. А. Оценка рекреационной привлекательности водоемов урбанизированных территорий юго-запада Беларуси по гидроморфологическим показателям 54
Kirichenko L. A., Volchak A. A. Assessment of the recreational attractiveness of reservoirs according to urbanized territories of the south-west of Belarus based on hydromorphological parameters
- Кухарчик Т. И., Рябычин К. О., Чернюк В. Д., Мелешко А. А. Загрязнение полистиролом прибрежных зон малых рек на урбанизированной территории 68
Kukharchuk T. I., Ryabychyn K. O., Chernyuk V. D., Meleshko A. A. Polystyrene pollution of the coastal zones of small rivers in an urban area
- Хрипович А. А., Тишковская Е. А. Геоэкологические факторы загрязнения почвы и подземных вод хлоридами в зоне воздействия объектов складирования галитовых отходов 78
Khripovich A. A., Tishkovskaya E. A. Geoecological factors of soil and groundwater contamination with chlorides in the zone of impact of halite waste storage facilities
- Мельник В. И., Бондаренко Ю. А. Определение оптимальных сроков сева озимых зерновых культур на территории Беларуси с учетом региональных и локальных климатических изменений 88
Melnik V. I., Bondarenko Yu. A. The determination of optimal times for sowing winter grain crops in the territory of Belarus taking into account regional and local climatic features

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

- Матвеев А. В., Рылова Т. Б., Шидловская А. В. Ландшафты климатического оптимума муравинского межледникового на территории Центральной Беларуси 95
Matveev A. V., Rylova T. B., Shidlovskaya A. V. Landscapes of the climatic optimum of the Muravian interglacial on the area of Central Belarus
- Жогло В. Г. Численная геофильтрационная модель подземных вод междуречья Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) 113
Zhoglo V. G. Numerical geofiltration model of underground water of the Vilia – Gozovka interfluve (Republic of Belarus)

Гайдукевич О. М., Курзо Б. В., Сорокин А. И.	Оценка запасов сапропеля в составе национального богатства Республики Беларусь	126
<i>Gaidukevich O. M., Kurzo B. V., Sorokin A. I.</i>	<i>The assessment for sapropel reserves in the composition of the national wealth of the Republic of Belarus</i>	

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

Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В.	Утилизация нефтешламов методом пиролиза с торфом	137
<i>Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Anufrieva E. V.</i>	<i>Utilization of oil sludge by pyrolysis with peat method</i>	
Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Пехтерева В. С., Навоша Ю. Ю., Калантаров М. Г., Марзан А. С., Фалюшина И. П.	Сравнительный анализ компонентного состава зрелой и погребенной древесины	144
<i>Tomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Pekhtereva V. S., Navosha Yu. Yu., Kalantarov M. G., Marzan A. S., Falyushina I. P.</i>	<i>Comparative analysis of the component composition of mature and buried wood</i>	
Сосновская Н. Е., Красноберская О. Г., Ракович В. А.	Влияние форм и концентраций на вымываемость микроэлементов и биологическую активность гранулированных органоминеральных удобрений	154
<i>Sosnovskaya N. E., Krasnoberskaya O. G., Rakovich V. A.</i>	<i>The effect of forms and concentrations on the water resistance of the microelements and biologic activity of granulated organomineral fertilizers</i>	
Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Кучинский М. П., Кучинская Г. М.	Феррогуматсодержащий препарат и перспективы его использования в ветеринарии	164
<i>Zhmakova N. A., Makarova N. L., Kuchinsky M. P., Kuchinskaya G. M.</i>	<i>Ferrohumate-containing preparation and prospects of its use in veterinary medicine</i>	
Шелоник М. А., Янута Г. Г.	Динамика изменений группового состава органической массы грибных субстратов при ферментации	176
<i>Shelonik M. A., Yanuta G. G.</i>	<i>Dynamics of changes in the group composition of organic mass of mushroom substrates during fermentation</i>	
Рупасова Ж. А., Авраменко С. Н., Добрянская К. А., Сулим Д. О., Павловский Н. Б., Дрозд О. В.	Генотипические особенности биохимического состава и антиоксидантного комплекса плодов голубики высокорослой (<i>Vaccinium Corymbosum</i> L.) в условиях Беларуси	185
<i>Rupasova Zh. A., Avramenko S. N., Dobryanskaya K. A., Sulim D. O., Pavlovsky N. B., Drozd O. V.</i>	<i>Genotypical features of biochemical composition and antioxidant complex of fruit of high blueberry (Vaccinium corymbosum L.) in Belarus conditions</i>	

ЮБИЛЕИ *JUBILEE*

К 70-летию со дня рождения Г. А. Камышенко	197
<i>To the 70th anniversary of G. A. Kamyshenko</i>	

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-5-17>
УДК 551.583

Поступила в редакцию 29.03.2024
Received 29.03.2024

**ЧАСТОТНАЯ СТРУКТУРА МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
АТЛАНТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИДЕКАДНОЙ
И СЕВЕРО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЙ**

В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий, Ю. А. Бровка

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены характерные временные особенности долгопериодных изменений Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО) и Северо-Атлантической осцилляции (САО), а также повторяемость западной формы циркуляции атмосферы по Г. Я. Вангенгейму – А. А. Гирсу. Особое внимание было уделено анализу квазишестидесятилетнего, квазидевятилетнего и квазивосьмилетнего колебаний АМО и САО. Климатическая система в работе рассмотрена как колебательная, где в случае совпадения или близости собственных частот колебаний с частотами повторяющихся во времени энергетически слабых внешних воздействий могут возникать резонансы и биения различного временного масштаба. Эта гипотеза получила в работе подтверждение: установлена суперпозиция собственных колебаний АМО и колебаний, связанных с планетными влияниями на климатическую систему. Мировой океан рассмотрен в работе как основное звено автоколебаний климатической системы.

Ключевые слова: Атлантическая мультideкадная осцилляция; Северо-Атлантическая осцилляция; циркуляция атмосферы; деклинационный прилив.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Микуцкий В. С., Бровка Ю. А. Частотная структура многолетней изменчивости Атлантической мультideкадной и Северо-Атлантической осцилляций // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 5–17.

**FREQUENCY STRUCTURE OF THE LONG-TERM VARIABILITY
OF THE ATLANTIC MULTIDECADAL
AND THE NORTH ATLANTIC OSCILLATIONS**

V. F. Loginov, V. S. Mikutskiy, Yu. A. Brovka

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

Abstract. The article considers the specific temporal features of long-period changes in Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and North Atlantic Oscillation (NAO) as well the frequency of the occurrence of the western form of the atmospheric circulation according to G. Ya. Vangengeim – A. A. Geers. Special attention was paid to the analyzing of quasi-sixty-year, quasi-nine-year and quasi-eight-year oscillations in the change of AMO and NAO. The climatic system is considered as an oscillatory system, where in case of the coincidence or proximity of the natural frequencies of oscillations with the frequencies of energetically weak external impacts repeated in time, the resonances and beating of different time scales can occur. This hypothesis was confirmed in the article: the superposition of the natural oscillations of AMO and oscillations related to planetary influences on the climate system was established. The world ocean is considered as the main link of the climate system auto oscillations.

Keywords: Atlantic Multidecadal Oscillation; North Atlantic Oscillation; atmospheric circulation; declinational tide.

For citation. Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A. Frequency structure of the long-term variability of the Atlantic Multidecadal Oscillation and the North Atlantic Oscillations. *Nature Management*. 2024, no. 1, pp. 5–17.

Введение. Как показано в многочисленных работах [1–18], в долгопериодной части частотной структуры Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО), Северо-Атлантической осцилляции (САО) и других гидрометеорологических характеристик содержится мощная квазидесятилетняя составляющая (55–65 лет). Ее амплитуда в изменении различных гидрометеорологических характеристик по разным оценкам колеблется от 15 до 45 % от общей дисперсии рядов. Проведенные нами исследования показали, что амплитуда квазидесятилетней составляющей изменяется в многолетнем и годовом ходе, а также подвержена региональным изменениям [2–5]. Она наиболее выражена в Восточной Европе в квадрате с координатами 47°–57° с. ш., 20°–38° в. д., включая территорию Беларуси, а также в изменении температуры воды Северной и Южной Атлантики и северной части Тихого океана [2, 3, 5].

В короткопериодной части спектра доминируют квазидевятилетние и квазивосьмилетние колебания, а также колебания в интервале частот 3–7 лет. Последний интервал характерен для колебания Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). Амплитуды квазидевятилетних и квазивосьмилетних колебаний изменяются в широких пределах (3–15 %), существенно трансформируясь в разных пространственно-временных интервалах [4–5, 14–17, 19–23]. Природа названных выше колебаний является предметом острых дискуссий. Квазидесятилетнее колебание в изменении гидрометеорологических характеристик чаще связывают с наличием в климатической системе автоколебаний подобной продолжительности [2, 3, 6–8, 12, 13]; имеется также ряд работ, в которых показано их космическое происхождение [2–4, 16, 17, 24].

Происхождение квазидевятилетних и квазивосьмилетних колебаний чаще связывается с влиянием внутренних процессов в климатической системе (взаимодействие океана и атмосферы), а также космическими факторами, такими как деклинационный лунный прилив в атмосфере и океане (18,61 года) или высокочастотными изменениями инсоляции, которые возникают в результате возмущений элементов земной орбиты Луной и планетами солнечной системы [3, 24–27]. В расчетах, основанных на вековых изменениях эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли, эти возмущения раньше не учитывались. На фоне существующей в результате изменения параметров Земной орбиты вековой тенденции сокращения приходящей от Солнца энергии отмечаются осложняющие ее квазидевятинадцатилетние вариации (18,61 года). В действительности, как отмечается в работе В. М. Федорова [25], восходящая и нисходящая фазы квазидевятинадцатилетнего цикла характеризуются продолжительностью 8 и 11 лет. Подробнее вопросы причинности выявленных циклов в изменении гидрометеорологических характеристик будут рассмотрены ниже.

Материалы и методика исследований. Значение индекса АМО представляет собой аномалию температуры воды (отклонение от среднего) в Северной Атлантике. Как правило, вычисляются среднегодовые значения АМО от экватора до 80° с. ш.

Нами использованы данные месячного разрешения проекта Kaplan Extended SST V2 [28], доступные на сайте Лаборатории физических наук Национального управления океанических и атмосферных исследований (PSL, NOAA, USA, <http://www.psl.noaa.gov/data/limeseries/AMO/>).

Для исследования частотной структуры изменений АМО применены метод анализа сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis, SSA) [29] и СВАН-анализ [30].

При СВАН-анализе нами использован скользящий временной интервал 56 лет. В этом случае задача сводилась к нахождению значений амплитудного спектра $A = A(t, f)$ (где t – середина скользящего временного окна; f – частота). Длина окна не должна быть слишком малой, поскольку при этом уменьшается точность спектрального анализа и, кроме того, теряется информация о низких частотах. По рекомендации [31] длина ряда (периода или подпериода) должна быть в 5–6 раз больше искомого периода (цикла). Завышенная «длина окна» также нежелательна, так как в этом случае будут сглаживаться высокочастотные колебания. Спектральный анализ в скользящих окнах временных рядов проведен с использованием Фурье-анализа, представленного программой Statistica.

Сплайновые тренды построены с помощью методов наименьших квадратов. Сплайны являются кривыми с минимальной кривизной, т. е. они максимально гладко аппроксимируют точки временного ряда. Отмечается, что сплайн-функция наиболее точно реализует линию, которую провел бы исследователь, пытаясь вручную осуществить аппроксимацию.

Использован также метод наложения эпох.

Результаты и их обсуждение. Анализ изменений АМО вблизи реперных дат (максимумов и минимумов) многолетнего квазидевятинадцатилетнего деклинационного прилива. В работе [4] нами было показано, что минимальные значения АМО наблюдались вблизи реперных дат, а максимумы значений АМО – на восходящей и нисходящей ветвях приливообразующей силы деклинационного прилива за 4–5 лет до и 4–5 лет после экстремумов (максимумов и минимумов) приливообразующей силы.

Полученный ранее результат можно подкрепить и путем проведения анализа методом наложения эпох средних величин АМО и величин отклонений значений АМО от тренда, вычисленного с применением сплайн-метода.

На рис. 1 представлены сглаженные среднегодовые значения АМО и отклонения от сплайнового тренда (остатки). На нем видно, что квазидесятилетнее колебание выбирает около 0,5 °С, а также заметна слабая трендовая составляющая, величина которой составляет около 0,2 °С. Остатки АМО были подвергнуты анализу методом наложения эпох.

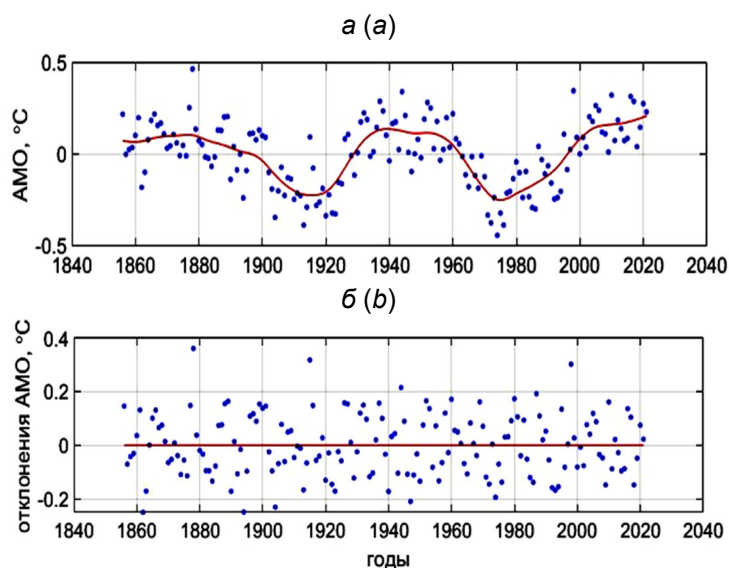


Рис. 1. Сплайнное сглаживание среднегодовых значений АМО (а) и отклонения АМО от сплайнного тренда (остатки) (б)

Fig. 1. Spline smoothing of annual mean AMO values (a) and AMO deviation from the spline trend (residuals) (b)

На рис. 2 методом наложения эпох представлены средние величины АМО за 8 лет до и 8 лет после реперных дат – минимумов (1864, 1882, 1901, 1920, 1938, 1957, 1975, 1994, 2013 г.) и максимумов (1873, 1892, 1910, 1929, 1947, 1966, 1985, 2003, 2022 г.) многолетнего деклинационного прилива. Из этого рисунка следует, что вблизи экстремумов деклинационного прилива (минимумов и максимумов) отмечаются низкие значения АМО, тогда как высокие значения АМО наблюдаются на восходящей и нисходящей ветви деклинационного прилива; они достигают максимальных значений на 4–5-й год до и после реперных дат. На графиках также заметно наличие квазидевятилетнего колебания в изменении средних величин АМО.

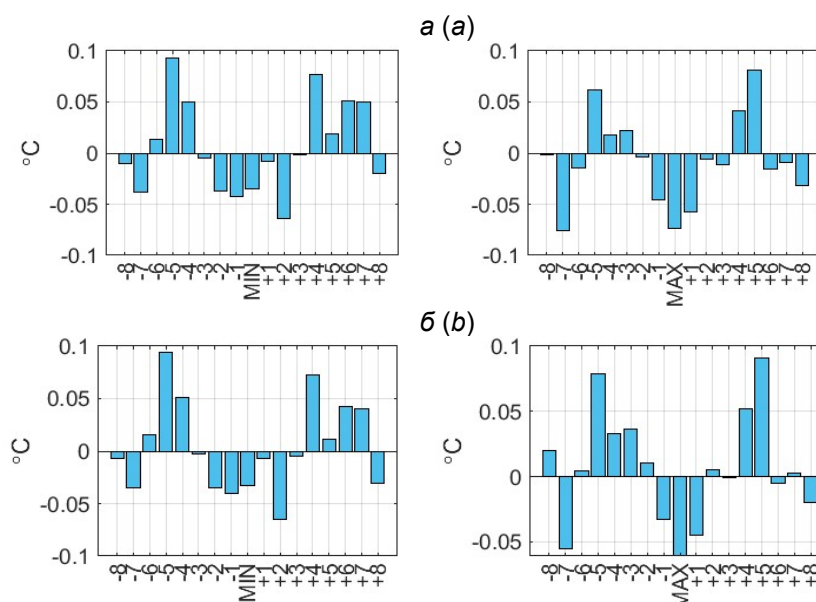


Рис. 2. Средние величины значений АМО (а) и средние величины отклонений значений АМО от тренда (сплайна, см. рис. 1) (б) вблизи реперных дат – минимумов и максимумов многолетнего деклинационного прилива

Fig. 2. Mean AMO values (a) and mean values of deviations of AMO values from the trend (spline, see Fig. 1) (b) near the key dates – minimum and maximum of the multi-year declinational tide

Анализ характера связи изменений индексов АМО, САО и повторяемости западной формы циркуляции атмосферы (W) по Г. Я. Вангенгейму – А. А. Гирсу [32]. Кроме известных характерных форм связей внешних факторов с различными крупномасштабными характеристиками в Атлантическом секторе не меньший интерес представляют оценки изменений их частотной структуры в разных частях спектра. Выше (см. рис. 1) были представлены сглаженные среднегодовые значения АМО и отклонения АМО от сплайнового тренда (остатки). Эти остатки, напоминающие хаотическое поле точек, были подвергнуты спектральному анализу.

На рис. 3 приведены периодограмма отклонений от сглаженного сплайна, вариант периодограммы с использованием весов Хемминга (спектрограмма) и видно, что на данных изображениях ярко проявляются квазидевятилетние колебания с максимумом в полосе частот 9,2–9,3 года.

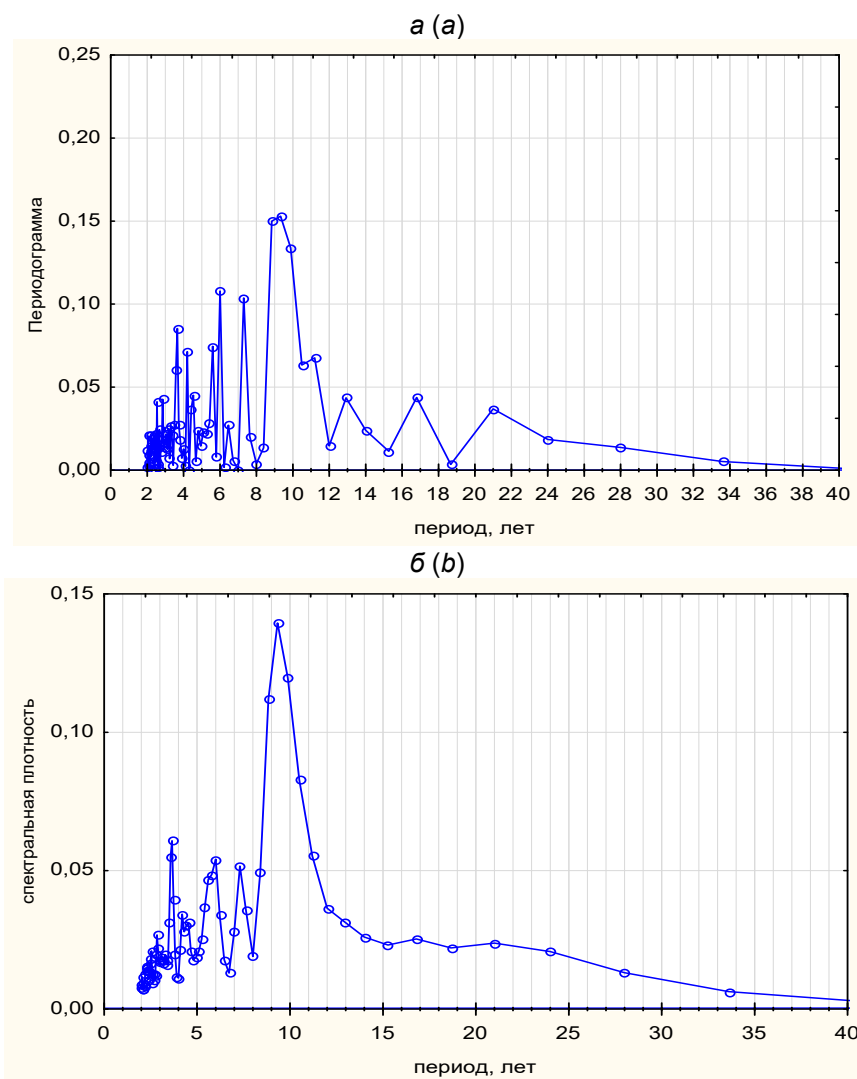


Рис. 3. Периодограмма отклонений АМО от сглаживающего сплайна (а) и сглаженная с помощью весов Хемминга периодограмма отклонений АМО (спектрограмма) (б). Наибольшая мощность находится в диапазоне частот 8,8–10 лет. Длина ряда – 168 (1855–2022 гг.)

Fig. 3. Periodogram of AMO deviations from the smoothing spline (a) and periodogram of AMO deviations smoothed with Hemming weights (spectrogram) (b). The highest power is in the frequency range of 8,8–10 years. The length of the series is 168 (1855–2022)

Другой важной характеристикой климатического режима в Атлантическом и Европейском секторах Северного полушария, как показано в многочисленных работах, является повторяемость различных форм циркуляции по Вангенгейму – Гирсу [32]. Авторы выделили три формы циркуляции: западную (W), восточную (E) и меридиональную (C). Классификация Г. Я. Вангенгейма основана на учете длинных

термобарических волн, наблюдаемых в толще тропосферы и нижней стратосферы, с которыми тесно связаны многие особенности распределения метеорологических и гидрологических полей Северной Атлантики. При процессах западной формы циркуляции (*W*) в толще тропосферы наблюдаются волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток. Как известно, характер длинных волн определяет тепловое состояние океана и суши посредством изменения степени трансформации солнечного излучения и уходящего длинноволнового излучения облачным покровом, а также изменениями газового и аэрозольного состава атмосферы.

В этой связи логично рассмотреть связь повторяемости западной формы циркуляции с такими феноменами крупномасштабной циркуляции в Атлантическом и Европейском секторах Северного полушария, как АМО и САО. Между повторяемостью западной и восточной форм циркуляции имеется тесная отрицательная связь ($r = -0,8$), что позволяет ограничиться рассмотрением одной из форм – западной. Среднегодовое число дней с западной формой циркуляции и сглаживающий сплайн (верхняя часть графика), а также отклонения от сглаживающего сплайна (остатки) представлены на рис. 4.

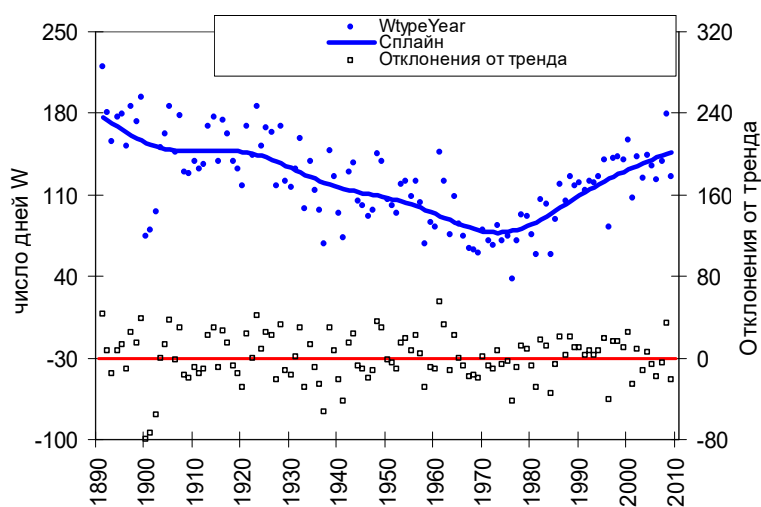


Рис. 4. Динамика годового числа дней *W* с западным типом циркуляции атмосферы по Г. Я. Вангейгейму (тренд – сглаживающий сплайн, сверху) и отклонения *W* от сглаживающего сплайна (внизу)

Fig. 4. Dynamics of the annual number of days *W* with the western type of atmospheric circulation according to G. Ya. Vangengeim (trend – smoothing spline, top) and deviation of *W* from the smoothing spline (bottom)

Сглаживающая кривая повторяемости *W* обнаруживает падение в интервале времени с 1891 г. до середины 1970-х годов с последующим ростом с 1970-х годов почти до конца используемого периода. В спектре отклонений повторяемости *W* (рис. 5) от сплайна обнаружены два заметных периода: продолжительность долгопериодного колебания составляет более 40 лет и ряд короткопериодных колебаний. Учитывая малую длину выборки, невозможно определить точную продолжительность долгопериодного колебания. В короткопериодной части спектра выделяется период, средняя длительность которого составляет около 9,4 года (см. рис. 5). Она близка к длительности периода (9,2–9,3 года), выявленного при спектральном анализе отклонений значений АМО от сглаживающего сплайна, имеющего квазидесятилетний характер.

Долгопериодные изменения амплитуды квазидесятилетнего цикла в изменении АМО и квазидесятилетнего цикла в изменении САО обнаруживают схожесть (рис. 6), что позволяет сделать вывод о тесной связи амплитуд колебаний около 8 и около 9 лет в изменении АМО, САО и повторяемости западной формы циркуляции по Вангенгейму – Гирсу за более чем столетний период.

Сравнительный анализ устойчивых во времени 7–10-летних компонент в изменении повторяемости формы *W* в скользящих 56-летних окнах показал наличие ярко выраженной квазидесятилетней составляющей в указанном интервале: максимум спектральной плотности приходится на период около 9,4 года. Результаты сравнительного анализа в скользящих окнах в работе не приводятся.

Таким образом, наличие квазидесятилетнего колебания следует считать надежно установленным фактом для такой крупномасштабной характеристики общей циркуляции атмосферы и океана, как АМО. В короткопериодной части спектра САО обнаруживается гармоника, близкая к восьми годам (~7,75 года) с изменяющейся амплитудой, синхронизированной с изменяющейся амплитудой квазидесятилетней (9,93 года) гармоники в изменении АМО (см. рис. 6).

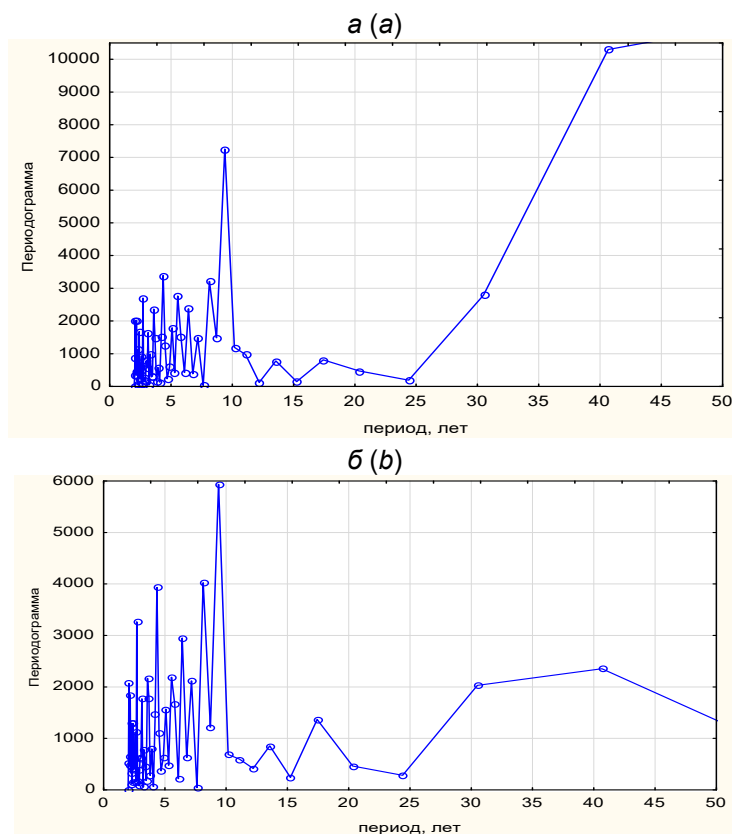


Рис. 5. Периодограммы значений годового числа дней W с западным типом циркуляции атмосферы по Г. Я. Вангейгейму (а) и их отклонений от сглаживающего сплайна (б)

Fig. 5. Periodograms of the values of the annual number of days W with the western type of atmospheric circulation according to G. Ya. Vangengeim (a) and their deviations from the smoothing spline (b)

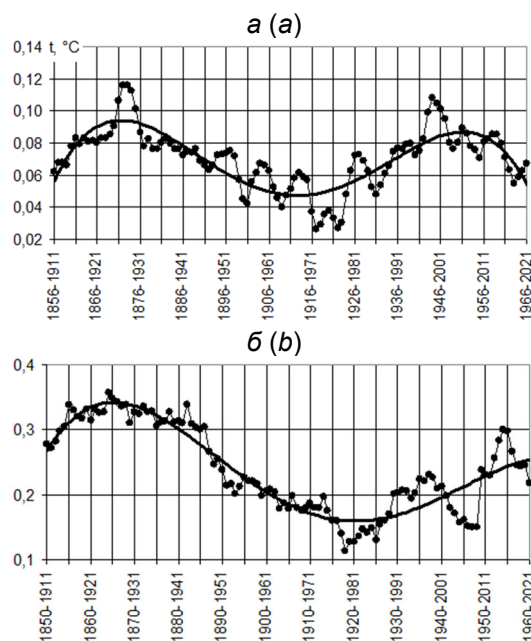


Рис. 6. Значения амплитуд: а – 9,33-годовой гармонике среднегодовых значений АМО (окно 56 лет); б – 7,75-годовой гармонике среднегодовых значений САО (окно 62 года)

Fig. 6. Amplitude values: а – 9,33-annual harmonic of the average annual values of AMO (56 year window); б – 7,75-annual harmonic of the average annual values of NAO (62 year window)

Многолетние изменения амплитуды квазидевятилетнего колебания в изменении АМО (~9,3 года) и амплитуды квазивосьмилетнего колебания в изменении САО (~7,75 года) имеют максимальные значения в периоды наибольшей повторяемости западной формы циркуляции. Эти периоды, наблюдавшиеся в 1900–1928 и 1996–2005 гг., характеризуются интенсивным выносом теплого и влажного воздуха с Атлантики, а также формированием теплых зим на территории Европы и в Западной Сибири (в 1-м естественном синоптическом регионе Б. П. Мультановского).

При увеличении притоков тепла из океана в атмосферу происходят более интенсивное развитие длинных волн, усиление меридионального воздухообмена и переход западной формы циркуляции в меридиональные формы – восточную и меридиональную, т. е. наступает период с высокой возмущенностью циркуляции атмосферы. Для последних двух форм циркуляции характерно формирование блокирующих ситуаций в атмосфере и, как следствие, засух и суровых зим. Это особенно характерно для восточной формы циркуляции в первом синоптическом регионе Б. П. Мультановского. В период развития западной формы (*W*) циркуляции в короткопериодной части спектра *W* наиболее ярко выражено квазидевятилетнее колебание (~9,4 года). Проведенное исследование показало, что в полосе частот (7–10 лет) в изменении различных гидрометеорологических характеристик на Евразийском континенте зачастую обнаруживаются циклы, обладающие статистической значимостью, что позволяет использовать их в практике сверхдолгосрочного прогнозирования [19].

Территория Республики Беларусь относится к зоне, где в изменении гидрометеорологических характеристик выделяется квазивосьмилетнее колебание. Это позволило нам учесть пространственно-временную когерентность квазипериодических компонент метеорологических полей при разработке метода долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования. Отметим, что летом в квадрате 44°–58° с. ш. и 15°–45° в. д. ярко выражена и квазিশестидесятилетняя компонента [5]. Эту особенность в изменении гидрометеорологического режима также можно учесть в долгосрочном и сверхдолгосрочном прогнозировании.

В заключение следует отметить еще одну обнаруженную характерную черту в изменении АМО и САО, которая имеет принципиальное значение.

Выявленная характерная связь изменений амплитуд квазидевятилетней и квазивосьмилетних колебаний в АМО и САО с повторяемостью и, как правило, интенсивностью зональной циркуляции (*W*) по Вангенгейму – Гирсу свидетельствует о том, что начальные условия в атмосфере определяют характер и степень проявления внешних (космических) факторов в климатической системе. Океан, в зависимости от временных масштабов изменений, может быть как внешним, так и внутренним климатообразующим фактором. Для рассматриваемых в работе временных масштабов океан является внешним фактором для атмосферы.

В случае доминирования зональной циркуляции в атмосфере (большая повторяемость западной формы циркуляции *W*) складываются более благоприятные условия для проявления внешних факторов в Евразийском секторе, нежели в случае развития восточной (*E*) и меридиональной (*C*) форм циркуляции. В последних двух случаях возмущенность атмосферной циркуляции становится большой, развиваются длинные волны, усиливается меридиональный воздухообмен и условия для проявления внешних факторов в климатической системе становятся неблагоприятными. Это может свидетельствовать о том, что начальные условия в климатической системе определяют характер проявления внешних факторов в атмосфере, т. е. нестабильность связей внешних факторов с параметрами атмосферы может определяться начальными условиями. Однако нестабильность таких связей не является синонимом их отсутствия.

Рассмотрим некоторые характерные особенности изменений САО. В работах [9, 20, 22] показано, что положительная и отрицательная фаза САО формируют противоположные по знаку аномалии солености вод в море Лабрадор. Последние, в свою очередь, оказывают воздействие на транспортировку холодных вод западными пограничными течениями. Указанные процессы могут создавать основу автоколебательного процесса в климате Атлантико-Европейского региона. Оценка времени транспортировки холодных вод в нижнем звене меридиональной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики показала, что среднее время переноса плотностных аномалий глубинных вод моря Лабрадор в субтропические широты составляет 7–8 лет [20]. Принимая во внимание вышеизложенное, значения индекса САО могут быть использованы в качестве функционала 7–8-летней составляющей в изменении термического режима вод Северной Атлантики. Значения индекса САО, как известно, определяются изменениями давления в Исландском и Азорском центрах действия атмосферы, а также изменениями морфометрических характеристик указанных центров. В изменении САО не обнаружено строгих периодических колебаний. Однако наличие циклов разной длительности и разной амплитуды обнаружено в ряде работ. Одним из таких циклов является квазивосьмилетний [19–23, 33]. Проведенный нами СВАН-анализ изменений индекса САО за период с 1825 по 2022 г. показал наличие квазивосьмилетнего цикла в изменении среднегодовых и зимних значений индекса САО.

Амплитуда обнаруженного цикла варьирует в широких пределах в зависимости от периода времени и времени года. Наибольшие амплитуды квазивосьмилетнего цикла приходятся на вторую половину XIX в. – первую треть XX в. Второй, менее выраженный максимум приходится на вторую половину XX в. – первые 10–15 лет текущего столетия. Проведенное нами сопоставление среднегодовых величин амплитуд квазивосьмилетнего цикла (7,75 лет) в изменении индекса САО и среднегодовых величин амплитуд квазидевятилетнего цикла (9,33 года) в изменении АМО указывает на их определенную синхронизацию в многолетнем ходе (см. рис. 6), приводящую к увеличению амплитуд квазидевятилетнего колебания (биения) через 72 года. Интересно отметить, что продолжительность установленного биения АМО с точностью до нескольких лет совпадает с продолжительностью выявленного ранее колебания температуры в Англии за период с 1659 по 2021 г. Особенно ярко этот цикл проявляется в последние два столетия.

Частотная структура изменений АМО как следствие резонансов и биений собственных частот (автоколебаний) и частот, генерируемых внешними воздействиями. Как известно, в изменении современного глобального и регионального климата содержатся трендовая, циклическая и случайная составляющие. Трендовая составляющая, как правило, приписывается влиянию антропогенных факторов на климат. Имеется достаточно оснований в пользу такой трактовки. Циклические составляющие разного временного масштаба связаны с влиянием внешних факторов, а также внутренней динамикой океана и взаимодействием океана и атмосферы. Механизмы, которые поддерживают эти колебания, отличаются большим разнообразием. Чаще принимается, что причина климатических колебаний кроется в самой климатической системе и является результатом сложных нелинейных взаимодействий между ландшафтными оболочками планеты (атмосферой, гидросферой, криосферой, биосферой). Существуют исследования, в которых показано, что изменения в климатической системе могут происходить и без внешних воздействий [34]. На протяжении всей истории климатических исследований интерес ученых к изучению реакции климата на воздействия внешних климатообразующих факторов (солнечная активность, влияние планет Солнечной системы, приливообразующие силы Луны и Солнца и др.) не ослабевал. Для указанных внешних факторов характерны циклические изменения разного временного масштаба. Последние обнаружены в изменении характеристик ландшафтных оболочек Земли (атмосферы, гидросферы, криосферы, биосферы). Выявлены также предпосылки учета циклических колебаний при сверхдолгосрочном метеорологическом прогнозировании и прогнозировании климата [3, 16, 17, 24–27, 35].

Согласно теории колебательных систем [11, 36–38] малая величина внешних воздействий на колебательную систему не является препятствием для модуляции резонансных колебаний на соизмеримых частотах. Соизмеримыми являются такие частоты, которые имеют малые циклические соотношения между собой, например: 1 : 2, 1 : 3, 2 : 3, 3 : 2 и т. д. Резонанс может возникать при слабой связи между объектами; слабость сил компенсируется многократным их воздействием. В работе [11] указано, что при наложении даже слабых связей между объектами, система переходит в такой режим движения, при котором частоты объектов становятся равными, кратными или находящимися в рациональных соотношениях. Способность сложных колебательных систем к самосогласованию – это результат естественной оптимизации системы по минимуму затрат энергии. В эволюционном масштабе времени накапливающиеся эффекты малых сил становятся определяющими. А. С. Монин и Д. М. Сонечкин [6] предполагали, что появление колебаний и циклов в климатической системе оказывает влияние на внешнее воздействие как прямую резонансную раскачку на собственных частотах на основе параметрического резонанса. Энергия малых импульсов внешних воздействий может оказаться недостаточной для возникновения простого резонанса, но достаточной для стохастического резонанса [11, 39].

В работе Б. Г. Шерстюкова [11] развивается идея о реальности механизма передачи повторяющихся воздействий космических факторов на колебательную климатическую систему посредством резонансов. Этот механизм функционирует на принципах слабых взаимодействий двух колебательных систем на равных, близких или соизмеримых частотах. Резонансный механизм может запускаться в действие слабыми регулярно повторяющимися внешними воздействиями на климатическую систему. Тем самым автоматически снимается основное возражение противников космических воздействий на погоду и климат. Основное внимание при этом должно быть сконцентрировано на поиске районов Земного шара, где собственные частоты колебаний гидрометеорологических характеристик (периоды автоколебаний) равны или близки к частоте колебаний даже слабой внешней климатообразующей силы. Этот вывод был сделан еще в 1960-х годах, когда были предприняты попытки объяснить неустойчивость солнечно-земных связей начальными условиями в климатической системе и околоземном космосе [35]. Именно неустойчивость солнечно-земных связей служила главным аргументом при отрицании таких связей и породила неоправданный скептицизм по отношению к проблеме космических влияний на климатическую систему. Этот скептицизм, к сожалению, сохранился, но стал более «мягким» по содержанию.

Как известно, при резонансном механизме возможно наличие временных периодов с разной степенью проявления воздействий внешних сил, т. е. вполне реально интенсивность биений может усиливаться или ослабляться.

В работе В. И. Бышева с соавторами [40] приводятся результаты, которые свидетельствуют о том, что в динамике современной климатической системы формируются автоколебания различной длительности. Такой тип изменчивости природных процессов характеризует флуктуации на собственных частотах, не обязательно совпадающих с частотой вынуждающей внешней силы. Длительность надежно установленных колебаний в климатической системе близка к 60-ти и 19-ти годам [3, 4, 8, 10, 14, 16, 18, 26, 27]. Последняя частота колебаний близка к частоте внешнего воздействия, связанного с частотой одного из обертонов долгопериодного деклинационного лунного прилива в атмосфере и океане. Его длительность составляет 9,305 года, т. е. равна полупериоду квазидевятнадцатилетнего деклинационного прилива (18,61 года). Представим некоторые аргументы в пользу предложенной гипотезы.

В изменении индекса САО обнаружен квазивосьмилетний цикл, который выбирает около 16 % общей дисперсии. Цикл с подобной длительностью обнаружен в изменчивости Гольфстрима [23, 41]. Нами показано, что в августе этот цикл в колебании атмосферного давления охватывает практически все Северное полушарие с максимальным проявлением в центре субтропического антициклонического круговорота Северной Атлантики в районе Гренландии и Исландии. В этих районах цикл определяет до четверти общей изменчивости приземного атмосферного давления [5]. Физическое обоснование квазивосьмилетнего цикла в море Лабрадор представлено в работе [20], где показано, что транспорт воды в нижнем звене меридиональной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики имеет среднее время переноса плотностных аномалий глубинных вод моря Лабрадор к субтропическим широтам ($26,5^{\circ}$ с. ш.) 7–8 лет. Положительная и отрицательная фазы САО формируют противоположные по знаку аномалии солености вод в море Лабрадор, которые оказывают воздействие на транспорт холодных вод западными пограничными течениями. Описанные процессы являются звеньями квазивосьмилетнего автоколебания климата Атлантико-Европейского региона.

Таким образом, как показано нами в работе [4], суперпозиция квазивосьмилетнего собственного колебания в климатической системе и квазидевятилетнего обертона деклинационного лунного прилива, который является вынуждающей силой, приводит к изменению амплитуды квазидевятилетнего колебания во времени. Это собственно и установлено нами в изменении индекса АМО за период с 1850 по 2021 г. Максимальные амплитуды квазидевятилетнего колебания АМО наблюдаются через 72 года. Последняя величина является наименьшим кратным восьми- и девятилетних колебаний. Схожесть в многолетнем изменении амплитуд указанных колебаний АМО и САО видна из рис. 6. Важно подчеркнуть, что фаза квазидевятилетнего колебания АМО остается практически постоянной. Это свидетельствует о том, что фаза вынуждающей силы – 9,305-летний обертон деклинационного лунного прилива – является устойчивым генератором обнаруженных колебаний в изменении АМО.

В заключение еще раз подчеркнем, что одной из причин неустойчивости установленных связей внешних факторов с параметрами климатической системы является их зависимость от начальных условий в атмосфере и гидросфере, например, от наличия в климатической системе энергоактивных зон, которые могут быть генераторами автоколебаний в климатической системе (собственных колебаний определенной частоты).

Проявление энергетически слабых внешних (космических) воздействий будет заметно только в случае совпадения или близости частот внешних факторов и собственных колебаний (автоколебаний) в климатической системе. Эта особенность в проявлении внешних факторов в климатической системе неоднократно отмечалась в литературе [3, 11, 16, 17, 35, 40].

Выводы.

1. Анализ многолетних изменений АМО показал наличие нескольких доминантных составляющих в изменении АМО.

2. Первым по величине вклада в изменение суммарной дисперсии является квазидесятилетнее колебание: его амплитуда выбирает от 15 до 45 % от общей изменчивости среднегодового ряда и сильно варьирует в пространстве.

3. Квазидевятилетнее колебание с изменяющейся амплитудой от $0,03^{\circ}\text{C}$ до $0,14^{\circ}\text{C}$ выбирает приблизительно 3–15 % от общей изменчивости АМО. Максимальные значения амплитуды квазидевятилетнего колебания разнесены на 72 года. Это может свидетельствовать о наличии в климатической системе биения указанной периодичности двух близких по частоте колебаний: квазидевятилетнего и квазивосьмилетнего. Первое из них, вероятно, определяется обертоном (9,305 года) потенциала долгопериодного деклинационного лунного прилива (18,61 года). Квазивосьмилетняя составляющая в изменении САО связана с наличием свободных колебаний (автоколебаний) указанной периодичности в Северной Атлантике. Время, в течение которого частица морской воды из субтропиков достигает субполярных широт в нижнем звене Атлантической меридиональной циркуляции, составляет около

8 лет. Эта величина близка к периоду автоколебаний (7–8 лет) [20]. Синхронизация квазидевятилетнего и квазивосьмилетнего колебания обеспечивает, как следствие, биение АМО с периодичностью 72 года. Статистический анализ амплитуд квазидевятилетней составляющей АМО и квазивосьмилетней составляющей САО для 56-летних скользящих интервалов подтверждает сделанное выше заключение.

4. Собственно функционированием резонансов и биений только и можно объяснить неустойчивый характер влияния энергетически слабых космических сил на климатическую систему. Большая повторяемость западной формы циркуляции (низкая возмущенность общей циркуляции атмосферы), совпадающая во времени с наибольшими амплитудами короткопериодных колебаний в полосе частот 8–10 лет, связана с благоприятными условиями проявления внешних факторов в климатической системе, генерирующих такие колебания.

Список использованных источников

1. Глобальное изменение природной среды (климат и водный режим) / под ред. Н. С. Касимова, Р. К. Клиге. – М. : Научный мир, 2000. – 304 с.
2. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2021. – 304 с.
3. Логинов, В. Ф. Космические факторы климатических изменений / В. Ф. Логинов ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2020. – 168 с.
4. Логинов, В. Ф. Многолетние изменения частотной структуры Атлантической мультideкадной осцилляции и Северо-Атлантической осцилляции и их возможные причины / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий, Ю. А. Бровка // Гидрометеорология и образование. – 2024. – № 1. – С. 5–22.
5. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 315 с.
6. Монин, А. С. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы / А. С. Монин, Д. М. Сонечкин ; Рос. акад. наук, Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова. – М. : Наука, 2005. – 191 с.
7. Нестеров, Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М. : Триада ЛТД, 2013. – 144 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. Полонский, А. Б. Роль океана в изменениях климата / А. Б. Полонский. – Киев : Наукова думка, 2008. – 183 с.
10. Полонский, А. Б. Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики / А. Б. Полонский, П. А. Сухонос // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – № 4. – С. 67–100.
11. Шерстюков, Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы / Б. Г. Шерстюков. – Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. – 221 с.
12. Шулейкин, В. В. Физика моря / В. В. Шулейкин. – М. : Наука, 1968. – 1083 с.
13. Яковлева, Н. И. К вопросу о причинах квазипериодических колебаний климата / Н. И. Яковлева // Труды ГГО. – 1969. – Вып. 236. – С. 35–44.
14. Hurrell, J. W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation / J. W. Hurrell // Science. – 1995. – Vol. 269. – P. 676–679.
15. Sarafanov, A. On the effect of the North Atlantic Oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters / A. Sarafanov // ICES J., Marine Sci. – 2009. – Vol. 66, № 7. – P. 1448–1454.
16. 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.
17. Veretenenko, S. Manifestation and Possible Reasons of ~60-Year Climatic Cycle in Correlation Links Between Solar Activity and Lower Atmosphere Circulation / S. Veretenenko, M. Ogurtsov // Problems of Geocosmos-2018. Springer Proceeding in Earth an Environmental Sciences. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_30
18. Изменения климата Арктики и Антарктики: результат действия естественных причин / Е. И. Фролов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 2 (85). – С. 52–61.
19. Лысенко, С. А. Пространственно-временная когерентность квазипериодических компонент метеорологических полей, как основа долгосрочных прогнозов погоды / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 499–507.
20. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening / L. Jackson [et al.] // Nature Geosci. – 2016. – Vol. 9, № 7. – P. 518–522.
21. Seip, K. L. The North Atlantic Oscillations: Cycle Times for the NAO, the AMO and the AMOC / K. L. Seip, O. Grøn, H. Wang // Climate. – 2019. – Vol. 7, № 3. – Art. 43. doi:10.3390/cli7030043
22. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean / M. Arthun [et al.] // Nature Communications. – 2017. – Vol. 8. – Art. 15875. doi:10.1038/ncomms15875
23. McCarthy, G. D. Gulf Stream Variability in the Context of Quasi-Decadal and Multidecadal Atlantic Climate Variability / G. D. McCarthy, T. M. Joyce, S. A. Josey // Geophys. Res. Lett. – 2018. – Vol. 45, № 20. – P. 11257–11264.
24. Максимов, И. В. Океан и космос / И. В. Максимов, Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 216 с.
25. Федоров, В. М. Инсоляция Земли и современные изменения климата / В. М. Федоров. – М. : Физматлит, 2018. – 232 с.

26. Войнов, Г. Н. Приливные явления и методология их исследований в шельфовой зоне арктических морей (на примере Карского и северо-восточной части Баренцева морей) : дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.28 / Г. Н. Войнов. – СПб., 2003. – 350 с.
27. Воробьев, В. Н. Лунный нодальный (деклинационный) прилив и его возможное влияние на циркуляцию атмосферы / В. Н. Воробьев, Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов // Ученые записки РГГМУ. – 2006. – № 2. – С. 7–19.
28. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991 / A. Kaplan [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Vol. 103, № C9. – P. 18567–18589.
29. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов : учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.
30. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. / сост.: А. Г. Гамбурцев [и др.] ; науч.-ред. совет: Н. П. Лаверов [и др.]. – М. : Янус-К, 2002. – Т. 3 : Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. – 652 с.
31. Вычислительная техника в применении к статическим исследованиям в автоматике / В. В. Солодовников [и др.]. – М. : Машгиз, 1963. – 167 с.
32. Гирс, А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 488 с.
33. Gastineau, G. Influence of the North Atlantic SST Variability on the Atmospheric Circulation during the Twentieth Century / G. Gastineau, C. Frankignoul // J. Climate. – 2015. – Vol. 28, № 4. – P. 1396–1416. doi:10.1175/JCLI-D-14-00424.1
34. Iwashima, T. Time-spaced spectral general circulation model, I-time-space spectral model of low-order barotropic system with periodic forcing / T. Iwashima, R. Yamamoto // J. Met. Soc. Japan. – 1986. – Vol. 64. – P. 183–196.
35. Сазонов, Б. И. Солнечно-тропосферные связи / Б. И. Сазонов, В. Ф. Логинов. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 116 с.
36. Молчанов, А. М. Гипотеза резонансной структуры солнечной системы / А. М. Молчанов // Пространство и время. – 2013. – № 1 (1). – С. 34–48.
37. Блехман, И. И. Синхронизация динамических систем / И. И. Блехман. – М. : Наука, Главная редакция физ.-мат. лит., 1997. – 894 с.
38. Бялко, А. В. Релаксационная теория климата / А. В. Бялко // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 1. – С. 111–116.
39. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / В. С. Анищенко [и др.] // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, № 1. – С. 7–38.
40. Междекадные осцилляции теплосодержания верхнего деятельного слоя океана в контексте короткопериодной изменчивости современного климата / В. И. Бышев [и др.] // Труды Государственного океанографического института. – 2016. – Вып. 217. – С. 323–343.
41. Федоров, А. М. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера / А. М. Федоров, И. Л. Башмачников, Т. В. Белоненко // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2018. – Т. 63, вып. 3. – С. 345–362.

References

1. *Global'noe izmenenie prirodnoj sredy (klimat i vodnyj rezhim)* [Global change of natural environment (climate and water regimes)]. Ed. by Kasimova N. S., Klige R. K. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2000, 304 p. (in Russian)
2. Loginov V. F. *Diagnoz global'nogo klimata* [Diagnosis of global climate]. St. Petersburg, Lema Publ., 2021, 304 p. (in Russian)
3. Loginov V. F. *Kosmicheskie faktory klimaticheskikh izmenenij* [Space factors of climate change]. *Nac. akad. nauk Belarusi, In-t prirodnopolzovaniya* [National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Nature Management]. Minsk, 2020, 168 p. (in Russian)
4. Loginov V. F., Mikutsky V. S., Brovka Yu. A. *Mnogoletnie izmeneniya chastotnoj struktury Atlanticheskoy mul'tidekadnoj oscillyacii i Severo-Atlanticheskoy oscillyacii i ih vozmozhnye prichiny* [Multiyear variations in the frequency structure of the Atlantic Multidecadal Oscillation and the North Atlantic Oscillation and their possible causes]. *Gidrometeorologiya i obrazovanie = Hydrometeorology and education*, 2024, no. 1, pp. 5–22 (in Russian)
5. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Current global and regional climate changes]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
6. Monin A. S., Sonechkin D. M. *Kolebaniya klimata po dannym nablyudenij: trojnoj solnechnyj i drugie cikly* [Observational climate variations: triple solar and other cycles]. Moscow, Nauka Publ., 2005, 191 p. (in Russian)
7. Nesterov E. S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean* [North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean]. Moscow, Triada Ltd Publ., 2013, 144 p. (in Russian)
8. Datsenko 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. Polonsky A. B. *Rol' okeana v izmeneniyah klimata* [The role of the ocean in climate change]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008, 183 p. (in Russian)
10. Polonsky A. B., Sukhonos P. A. *Severoatlanticheskoe kolebanie i byudzhet tepla verhnego sloya Severnoj Atlantiki* [North Atlantic Oscillation and heat budget of the upper layer of the North Atlantic]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2019, no. 4, pp. 67–100 (in Russian)

11. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'nie svyazi, prognozy* [Climate oscillation system, resonances, long-range communications, forecasts]. Obninsk, All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center Publ., 2021, 221 p. (in Russian)
12. Shuleykin V. V. *Fizika morya* [Physics of the sea]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 1083 p. (in Russian)
13. Yakovleva N. I. *K voprosu o prichinakh kvaziperiodicheskikh kolebanij klimata* [To the question of the causes of quasi-periodic climate fluctuations]. *Trudy GGO = Proceedings of the Main Geophysical Observatory*, 1969, iss. 236, pp. 35–44 (in Russian)
14. Hurrell J. W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, vol. 269, pp. 676–679.
15. Sarafanov A. On the effect of the North Atlantic Oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters. *ICES J., Marine Sci.*, 2009, vol. 66, no. 7, pp. 1448–1454.
16. 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.
17. Veretenenko S., Ogurtsov M. Manifestation and possible reasons of ~60-year climatic cycle in correlation links between solar activity and lower atmosphere circulation. Problems of geocosmos-2018. Springer proceeding in Earth and environmental sciences. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_30
18. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Smolyanitsky V. M. *Izmeneniya klimata Arktiki i Antarktiki: rezul'tat dejstviya estestvennykh prichin* [Arctic and Antarctic climate change: the result of natural causes]. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic issues*, 2010, no. 2 (85), pp. 52–61 (in Russian)
19. Lysenko S. A., Loginov V. F. *Prostranstvenno-vremennaya kogerentnost' kvaziperiodicheskikh komponent meteorologicheskikh polej, kak osnova dolgosrochnykh prognozov pogody* [Spatial and temporal coherence of quasi-periodic components of meteorological fields as a basis for long-term weather forecasts]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 499–507 (in Russian)
20. Jackson L. C., Peterson A. K., Roberts C. D., Wood R. A. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening. *Nature Geosci.*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 518–522.
21. Seip K. L., Grøn O., Wang H. The North Atlantic Oscillations: Cycle Times for the NAO, the AMO and the AMOC. *Climate*, 2019, vol. 7, no. 3, art. 43. doi:10.3390/cli7030043
22. Arthun M., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H. L., Keenlyside N. S. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, art. 15875. doi:10.1038/ncomms15875
23. McCarthy G. D., Joyce T. M., Josey S. A. Gulf stream variability in the context of quasi-decadal and multidecadal Atlantic climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, vol. 45, no. 20, pp. 11257–11264.
24. Maximov I. V., Sarukhanyan E. I., Smirnov N. P. *Okean i kosmos* [Ocean and space]. Leningrad, Gidrometeeoizdat Publ., 1970, 216 p. (in Russian)
25. Fedorov V. M. *Insolyaciya Zemli i sovremennye izmeneniya klimata* [Insolation of the Earth and modern climate change]. Moscow, Physmatlit Publ., 2018, 232 p. (in Russian)
26. Voinov G. N. *Prilivnye yavleniya i metodologiya ih issledovaniy v shel'fovoj zone arkticheskikh morej (na primere Karskogo i severo-vostochnoj chasti Barentseva morej)*. Diss. dokt. geogr. nauk [Tidal phenomena and methodology of their research in the shelf zone of the Arctic seas (by the example of the Kara and north-eastern part of the Barents Seas)]. Dr. geogr. sci. diss.]. St. Petersburg, 2003. 350 p. (in Russian)
27. Vorobyev B. N., Sarukhanyan E. I., Smirnov N. P. *Lunnyj nodal'nyj (deklinationnyj) priliv i ego vozmozhnoe vliyanie na cirkulyaciyu atmosfery* [Lunar nodal (declinational) tide and its possible influence on atmospheric circulation]. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2006, no. 2, pp. 7–19 (in Russian)
28. 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.
29. Golyandina N. E. *Metod "Gusenica"-SSA: analiz vremennykh ryadov: ucheb. posobie* [Method "Caterpillar"-SSA: analysing time series]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2004, 76 p. (in Russian)
30. *Atlas vremennykh variacij prirodnykh, antropogennykh i social'nykh processov* [Atlas of temporal variations of natural, anthropogenic and social processes]. Gamburtsev A. G. [et al.] (compilers). T. 3. *Prirodnye i social'nye sfery kak chasti okruzhayushchej sredy i kak ob'ekty vozdeystvija* [Vol. 3. Natural and social spheres as parts of the environment and as objects of impacts]. Moscow, Janus-K Publ., 2002, 652 p. (in Russian)
31. Solodovnikov V. V., Matveev P. S., Waldenberg Yu. S., Baburin V. M. *Vychislitel'naya tekhnika v primenenii k staticheskim issledovaniyam v avtomatike* [Computing technique in application to static studies in automatics]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 167 p. (in Russian)
32. Girs A. A. *Makrocirkulyacionnyj metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov* [Macrocirculation method of long-term meteorological forecasts]. Leningrad, Gidrometeeoizdat Publ., 1974, 488 p. (in Russian)
33. Gastineau G., Frankignoul C. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century. *J. Climate*, 2015, vol. 28, no. 4, pp. 1396–1416. doi:10.1175/JCLI-D-14-00424.1
34. Iwashima T. Time-spaced spectral general circulation model, I-time-space spectral model of low-order barotropic system with periodic forcing. *J. Met. Soc. Japan*, 1986, vol. 64, pp. 183–196.
35. Sazonov B. I., Loginov V. F. *Solnechno-troposfernye svyazi* [Solar-tropospheric connections]. Leningrad, Gidrometeeoizdat Publ., 1969, 116 p. (in Russian)
36. Molchanov A. M. *Gipoteza rezonansnoj struktury solnechnoj sistemy* [Hypothesis of the resonance structure of the solar system]. *Prostranstvo i vremya = Space and Time*, 2013, no. 1(1), pp. 34–48 (in Russian)
37. Blekhman I. I. *Sinhronizaciya dinamicheskikh sistem* [Synchronisation of dynamic systems]. Moscow, Nauka, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature Publ., 1997, 894 p. (in Russian)

38. Byalko A. V. *Relaksacionnaya teoriya klimata* [Relaxation theory of climate]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in the Physical Sciences*, 2012, vol. 182, no. 1, pp. 111–116 (in Russian)
39. Anishchenko V. S., Neiman A. B., Moss F., Szymanski-Gayer L. *Stokhasticheskiy rezonans kak inducirovannyj shumom effekt uvelicheniya stepeni poryadka* [Stochastic resonance as a noise-induced effect of increasing degree of order]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*, 1999, vol. 169, no. 1, pp. 7–38 (in Russian)
40. Byshev V. I., Neiman V. G., Anisimov M. V., Gusev A. V., Romanov Yu. A., Serykh I. V., Sidorova A. N., Figurkin A. L., Anisimov I. M. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta "Mezhdekadnye oscillyacii teplosoderzhaniya verhnego deyatel'nogo sloya okeana v kontekste korotkoperiodnoj izmenchivosti sovremennogo klimata"* [Proc. of the St. Oceanographic Inst. "Interdecadal oscillations of upper-ocean heat content in the context of short-period variability of modern climate"]. 2016, iss. 217, pp. 323–343 (in Russian)
41. Fedorov A. M., Bashmachnikov I. L., Belonenko T. V. *Lokalizaciya oblastej glubokoj konvekcii v moryah Severo-Evropejskogo bassejna, Labrador i Irmingera* [Localization of areas of deep convection in the seas of the North European Basin, Labrador and Irminger]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, iss. 3, pp. 345–362 (in Russian)

Информация об авторах

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

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

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

Information about the authors

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

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

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-18-29>
УДК 551.581; 551.584.2

Поступила в редакцию 19.03.2024
Received 19.03.2024

МЕЗОМАСШТАБНОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ОБЛЕСЕНИИ И ПОВТОРНОМ ЗАБОЛАЧИВАНИИ ЗЕМЕЛЬ: СРАВНЕНИЕ С ОЦЕНКАМИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Лысенко, П. О. Зайко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе мезомасштабной численной модели WRF (Weather Research and Forecasting), модели атмосферного водного баланса и данных дистанционного зондирования Земли проведены численные эксперименты по оценке потенциальных изменений климата в Гомельском Полесье в теплый период года (апрель – сентябрь) при повторном заболачивании и облесении земель в данном регионе: рассчитаны изменения температуры, количества осадков, потоков явного и скрытого тепла в дневное и ночное время.

Климатический эффект мелиорации достигается главным образом за счет изменений альбедо, эвапотранспирации и шероховатости подстилающей поверхности, которые в совокупности влияют на радиационный и тепловой балансы подстилающей поверхности, конвективные процессы в планетарном пограничном слое атмосферы, облачность и осадки.

Численными экспериментами показано, что при заболачивании земель произойдет общее понижение температуры воздуха в регионе на 0,2–0,3 °С. Максимальное изменение потока скрытого тепла составит около +0,66 Вт/м², что соответствует увеличению месячного испарения на 6,1 мм. Перепады температуры на протяжении суток уменьшились в среднем на 0,8 °С. Увеличение испарения с подстилающей поверхности приведет к росту массовой доли водяного пара как в Гомельском Полесье, так на всей территории Беларуси. В среднем для летнего периода рост удельной влажности воздуха на высоте 2 м составил 4,5 %. Влияние обводнения территории Гомельского Полесья на атмосферные осадки неоднозначно: максимальное увеличение осадков для теплого сезона 2010 г. наблюдалось для июня – июля и составило около 2,7 % от нормы.

Эффект увеличения лесистости в численных экспериментах проявится в понижении среднесуточной температуры воздуха на 0,3–0,4 °С (максимально – на востоке Гомельской области), уменьшении амплитуды суточного цикла температуры на 0,9–1,4 °С и максимальном увеличении среднемесячного испарения в вегетационный период на 14 мм.

Ключевые слова: испарение; аридность; обводнение территории; численное моделирование; дистанционное зондирование Земли.

Для цитирования. Лысенко С. А., Зайко П. О. Мезомасштабное гидродинамическое моделирование климата Гомельской области при облесении и повторном заболачивании земель: сравнение с оценками на основе данных дистанционного зондирования Земли // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 18–29.

MESOSCALE HYDRODYNAMIC CLIMATE MODELLING IN GOMEL REGION UNDER REFORESTATION AND RE-SWAMPING SCENARIOS: COMPARISON WITH ESTIMATIONS BASED ON REMOTE SENSING DATA

S. A. Lysenko, P. O. Zaiko

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

Abstract. Numerical experiments based on the mesoscale WRF (Weather Research and Forecasting) model, atmospheric water balance model and Earth remote sensing data, have been carried out to assess potential climate changes in Gomel Polesie in the warm period of the year (April – September) under the scenarios of re-swamping and reforestation of lands in this region: changes in temperature, precipitation, the fluxes of apparent and latent heat during daytime and nighttime have been calculated.

The climatic effect of melioration is achieved mainly due to changes in albedo, evapotranspiration and underlying surface roughness, which together affect the radiation and heat balance of the underlying surface, convective processes in the planetary boundary layer of the atmosphere, cloudiness and precipitation.

Numerical experiments show that, as the result of re-swamping there would be a general decrease in air temperature in the region by 0.2–0.3 °C. The maximum change in latent heat flux was about +0.66 W/m², which means an increase in

monthly evaporation by 6.1 mm. Temperature variations throughout the day decreased by 0.8 °C on average. The increase in evaporation from the underlying surface leads to an increase in the mass fraction of water vapor not only in Gomel Polesie, but also over the whole territory of Belarus. On average for the summer period, the increase of specific humidity of air at 2 m was 4.5 %. The influence of watering of the territory of Gomel Polesie on atmospheric precipitation is ambiguous: the maximum increase in precipitation for the warm season of 2010 was observed for June – July and was about 2.7 % of the norm.

The effect of reforestation in numerical experiments was manifested in the decrease of average daily air temperature by 0.3–0.4 °C (the maximum was observed in the east of Homiel region), the amplitude decrease of daily temperature cycle by 0.9–1.4 °C and the maximum increase of average monthly evaporation during the growing season by 14 mm.

Keywords: evaporation; aridity; waterlogging; numerical modeling; remote sensing.

For citation. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Mesoscale hydrodynamic climate modelling in Gomel region under reforestation and re-swamping scenarios: comparison with estimations based on remote sensing data. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 18–29.

Введение. В последние четыре десятилетия отмечается беспрецедентное по скорости глобальное потепление, которое проявляется не только в росте средних температур, но и в существенных трансформациях окружающей среды, растительного и животного мира во многих регионах земного шара. В Беларуси среднегодовая температура растет со скоростью, втрое превышающей скорость глобального потепления [1, 2]. Границы агроклиматических областей Беларуси, определяемые по годовой сумме активных среднесуточных температур выше 10 °C, продвигаются в северном направлении со скоростью около 12 км/год. Одновременно с ростом температуры воздуха происходит усиление засушливости климата Беларуси. Средняя для Беларуси разница между годовым количеством осадков и потенциальным испарением уменьшается со скоростью примерно 6 мм/год, а граница нулевого баланса между осадками и потенциальным испарением продвигается с юга на север Беларуси со средней скоростью около 19 км/год [1]. В современный период потенциальное испарение превалирует над осадками практически на всей территории Брестской и Гомельской областей Беларуси. Среднее для Беларуси значение индекса аридности, определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1980 по 2020 г. уменьшилось на 30 % и в современный период составляет примерно 0,8.

Наиболее уязвимым перед современным изменением климата является регион Белорусского Полесья, который в 1960–70-е годы подвергся осушительной мелиорации, приведшей впоследствии к масштабной деградации торфяных почв в этом регионе. Данные наблюдений показывают, что климат мелиорированных территорий является наиболее экстремальным по ряду показателей: продолжительности и интенсивности заморозков, повторяемости зим с низкими температурами и малой высотой снежного покрова, продолжительности периодов с высокой температурой воздуха и др. [3, 4]. Усиление засушливости климата этого региона оказывает крайне негативное влияние на продуктивность большинства местных (аборигенных) видов растительности, не приспособленных к новым климатическим условиям [5]. Нехватка почвенной влаги особенно ощутимо сказывается на биологической продуктивности пахотных земель Белорусского Полесья и урожайности сельскохозяйственных культур, традиционно выращиваемых в этом регионе [2, 6, 7].

Принимая во внимание проблемы засух и деградации земель в Полесье, Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь совместно с Программой развития Организации Объединенных Наций и партнерами с 1999 г. ведутся проекты в области устойчивого управления водно-болотными угодьями и повторного заболачивания торфяников. С 2020 г. в Беларуси реализуется Дорожная карта по осуществлению повторного заболачивания нарушенных торфяников и адаптации водных ресурсов Гомельской области к изменению климата, утвержденная Советом Министров Республики Беларусь.

По оценкам специалистов Института природопользования НАН Беларуси, испарение на территории Гомельской области Беларуси способно обуславливать около 5–10 % общего количества атмосферных осадков, выпадающих в этом регионе в вегетационный период [8]. Роль испарения наиболее существенна в начале лета (май – июнь), когда испарение и транспирация достигают своих максимальных значений. С июля по сентябрь вклад испарения в сумму атмосферных осадков составляет не более 5 %. Полученные оценки в целом согласуются с результатами работ [9–12], в которых влияние переиспарения влаги на атмосферные осадки оценено в пределах 8–15 %.

Экспериментальные наблюдения за микроклиматом после создания водохранилищ в пригородных зонах Беларуси показывают, что их воздействие проявляется в изменениях температуры воздуха, количества атмосферных осадков и ветрового режима в радиусе 250–300 м [13]. Ширина зоны изменений микроклимата по периметру водохранилищ неодинакова и трансформируется в зависимости от характера природы побережий. На сильно облесенных участках побережий зона влияния водохранилищ имеет минимальную ширину. На открытых и пологих участках (пашня, луг) она увеличивается в 1,5–2 раза. При этом на размеры зоны микроклиматических изменений существенное влияние оказывает направление преобладающих ветров. На территории Беларуси преобладают ветры западного

направления, что связано с западным переносом атлантического воздуха умеренных широт и циклонической деятельностью на полярном и арктическом фронтах. В связи с этим зона влияния водохранилищ на восточном побережье шире, чем на западном.

По данным исследований [14], гидрогеологическое влияние мелиоративных систем в зависимости от типа торфяного месторождения, рельефа, свойств подстилающей поверхности и общей гидрогеологической ситуации простирается от 400–500 м до 5–7 км. Для условий Полесья эта величина оценивается в 1,5–3 км. С понижением уровня грунтовых вод испарение с подстилающей поверхности, как правило, уменьшается, однако при сельскохозяйственном использовании осушенных территорий возрастает транспирация растений, поэтому суммарное испарение в сравнении с неосушенными или осушенными, но не освоенными болотами может даже увеличиваться [4].

Результаты моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на территории Восточно-Европейской равнины [15] показывают, что важную роль в формировании атмосферных осадков и температурного режима в теплый период года играет лесистость территории. При обезлесении модельной области (55°–59° с. ш., 28°–37° в. д.) в численных экспериментах отмечаются тенденции роста приземных температур и уменьшения количества атмосферных осадков, причем не только в модельной области, но и на значительном удалении от нее. Отмечается также увеличение продолжительности периодов с аномально жаркими погодными условиями, снижение повторяемости туманов и заморозков в мае и сентябре. В сценарии облесения модельной области отмечаются обратные тенденции. В частности, сумма осадков с июня по июль увеличивается на 4,8 % внутри модельной области и на 1,0 % за ее пределами.

Климатические последствия мелиорации водно-болотных угодий и пахотных земель исследованы в работе [16]. Результаты мезомасштабного моделирования показали, что осушение и урбанизация водно-болотных угодий, как и застройка пахотных земель, приводят к увеличению приземной температуры воздуха и потока явного тепла с подстилающей поверхности. Влияние же землепользования на атмосферные осадки неоднозначно: при любых изменениях землепользования сумма осадков в одних районах увеличивается, а в других уменьшается так, что ее среднее значение практически не изменяется. В целом, исходя из работ зарубежных авторов [16–18], можно заключить, что прямая зависимость между испарением и атмосферными осадками на ограниченной территории суши отсутствует.

В настоящей работе предпринята попытка оценить потенциальные возможности смягчения неблагоприятных для Беларуси последствий изменения климата за счет увеличения лесистости и вторичного заболачивания ранее осушенных земель. В своих выводах авторы исходили из многолетних данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), мезомасштабного моделирования атмосферных процессов и балансовых расчетов на основе реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Приведенные в работе оценки получены для двух достаточно идеализированных сценариев мелиорации, предполагающих кардинальную трансформацию региональной структуры землепользования (замену пахотных земель на леса и заболачивание пахотных земель), и поэтому характеризуют лишь потенциальные возможности антропогенного регулирования регионального климата. Тем не менее полученные оценки дают количественное представление об эффективности различных мелиоративных мероприятий и могут служить отправной точкой для выработки рекомендаций по смягчению неблагоприятных последствий изменений климата для Республики Беларусь.

Материалы и методы исследования. Предметом исследования являлись средние распределения по территории Беларуси температуры приземного воздуха и подстилающей поверхности, суммарного испарения (эвапотранспирации) и количества атмосферных осадков в вегетационный период (с мая по сентябрь). Под изменениями метеорологических параметров понимались разницы их средних величин до и после преобразования подстилающей поверхности (мелиорации).

Оценку изменений температуры подстилающей поверхности (LST) и амплитуды ее суточного хода, фактической (ET) и потенциальной (PET) эвапотранспирации проводили, основываясь на данных спутникового спектрорадиометра MODIS за 2000–2020 гг. Эту задачу решали эмпирическим методом, основанном на попиксельном анализе методом скользящего окна геопространственных продуктов MOD11A1 V6.1 (дневная и ночная температура подстилающей поверхности) и MOD16A2 V105 (8-дневная эвапотранспирация). На базе параметрических карт MODIS для исследуемого региона вычисляли средние значения параметров подстилающей поверхности в окрестности каждого пиксела при двух бинарных масках, задающих тип поверхности до и после мелиорации. Для этой цели использовали скользящее окно радиусом 30 км и схему классификации подстилающей поверхности Global Land Cover 2019 (GLC2019), основанную на данных спутниковых приборов Европейского Космического Агентства. Значения LST, ET и PET для каждого пиксела, относящегося к подстилающей поверхности до мелиорации, заменяли их средними значениями в окрестности этого пиксела для подстилающей поверхности после

мелиорации. Полученные путем такой замены карты изменений параметров подстилающей поверхности агрегировали по 118 административным районам Беларуси и осредняли за весь доступный ряд наблюдений (с 2000 по 2020 г.) с целью получения оценок климатического воздействия мелиорации.

Оценки изменений климатических параметров на мелиорируемой территории сравнивали с результатами численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на базе модели WRF 4.1 (Weather Research and Forecasting), применяемой в национальной гидрометеорологической службе Беларуси для краткосрочных прогнозов погоды.

В качестве модельного региона с изменяемой структурой землепользования нами был выбран регион Белорусского Полесья, который содержал наибольший процент мелиорированных земель (51°–53° с. ш., 26°–32° в. д.). Структуру землепользования в модельном регионе и во всем расчетном домене модели WRF (48°–56° с. ш., 21°–35° в. д.) классифицировали на основе данных GLC2019, которые лучше стандартных данных WRF отражают современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси и имеют более высокое пространственное разрешение – 100 м.

В нашем случае главным недостатком численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на мелиорируемой территории является сложность оценок климатических изменений, поскольку они требуют чрезвычайно длительных вычислений, особенно если это касается оценок изменений атмосферных осадков, подверженных большой пространственной и временной изменчивости. В связи с этим для оценок влияния мелиорации на распределение атмосферных осадков использовали метод, основанный на квазистационарной модели баланса влаги в столбе атмосферного воздуха, справедливой при длительных периодах осреднения [16–19].

Влагосодержание атмосферного столба складывается из приходной части, формируемой поступлением влаги в результате процессов адвекции и местного испарения, и расходной, связанной с выпадением атмосферных осадков. При осреднении уравнения баланса атмосферной влаги за достаточно длительный промежуток времени (около месяца) его с достаточной степенью точности можно записать в стационарном приближении [16–18]:

$$Q_{in} - Q_{out} + E - P = 0, \quad (1)$$

где Q_{in} и Q_{out} – количество влаги, привносимой за единицу времени в единичный столб атмосферы и выносимой из него в результате адвекции; E – суммарное испарение (эвапотранспирация); P – скорость выпадения атмосферных осадков. Все величины, входящие в уравнение (1), имеют размерность $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и соответствуют их средним значениям за выбранный период.

Уравнение (1) можно записать отдельно для влаги, образующейся за счет адвекции и за счет переиспарения ранее выпавших осадков (рециркуляции осадков). В первом из этих уравнений будет отсутствовать компонента E , а во втором – Q_{in} . Искомой неизвестной в этих уравнениях будет доля общего количества осадков, обусловленная местным испарением R , которую в дальнейшем станем называть индексом рециркуляции осадков. Для его нахождения часто вводится дополнительное предположение, что атмосферные осадки, обусловленные адвекцией влаги P^a и местным испарением P^r , пропорциональны соответствующим потокам влаги – Q_{out}^a и Q_{out}^r [16–18]. В этом случае индекс рециркуляции осадков легко рассчитывается по известным значениям суммарного испарения E и адвективного потока влаги Q_{in} :

$$R = (1 + Q_{in} / E)^{-1}, \quad (2)$$

Данный метод можно несколько модифицировать для получения пространственного распределения осадков, выпадающих в результате местного испарения [19]. Для этого введем сетку географических координат с узлами в точках $x_j = j\Delta x$ и $y_i = i\Delta y$ ($i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, M$), где Δx и Δy – шаги сетки по широте и долготе соответственно, на которой зададим значения испарения E_{ij} , осадков P_{ij} , зонального F_{ij} (направленного на восток) и меридионального G_{ij} (направленного на север) потоков влаги. Записав уравнение (2) для общей и рециркулирующей влаги в узлах данной сетки и используя предположение о пропорциональности средних за длительный промежуток времени значений адвективных потоков и скоростей выпадения осадков для влаги разного происхождения, несложно получить расчетные формулы для индекса рециркуляции осадков [2, 19]:

$$R_{ij}^v = \frac{(Q_{in}^r)_{ij} + E_{ij}\Delta x\Delta y}{(Q_{in}^{tot})_{ij} + E_{ij}\Delta x\Delta y},$$

$$(Q_{in}^{tot})_{ij} = (F_{i,j-1/2}^{in} + F_{i,j+1/2}^{in})\Delta y + (G_{i-1/2,j}^{in} + G_{i+1/2,j}^{in})\Delta x, \quad (3)$$

$$(Q_{in}^r)_{ij} = (F_{i,j-1/2}^{in} R_{i,j-1}^{v-1} + F_{i,j+1/2}^{in} R_{i,j+1}^{v-1})\Delta y + (G_{i-1/2,j}^{in} R_{i-1,j}^{v-1} + G_{i+1/2,j}^{in} R_{i+1,j}^{v-1})\Delta x,$$

где $(Q_{in}^{tot})_{ij}$ и $(Q_{in}^r)_{ij}$ – средние скорости поступления общей (верхний индекс «tot») и рециркулирующей (верхний индекс «r») влаги в элементарную пространственную ячейку за счет ее адвекции из соседних ячеек; $F_{i,j\pm 1/2}^{in}$ и $G_{i,j\pm 1/2}^{in}$ – притоки влаги в ячейку вдоль координатных осей x и y соответственно, которые рассчитываются по известным сеточным значениям зональных и меридиональных потоков $F_{i,j\pm 1}$ и $G_{i,j\pm 1}$; $v = 1, 2, \dots$ – номер итерации (поскольку в формулу для коэффициента рециркуляции в узле сетки (i, j) входят его значения для соседних узлов, то решение уравнений (3) производится методом последовательных приближений).

Для расчета внутреннего влагооборота на территории Беларуси использовали среднемесячные данные по испарению, осадкам и интегральным по вертикальной координате потокам влаги в зональном и меридиональном направлениях, взятые из реанализа ERA5. Распределение атмосферных осадков, сформированных в результате местного испарения, рассчитывали для каждого административного района Беларуси на основе итерационного решения системы уравнений (3). Трансформацию поля атмосферных осадков, вызванную мелиорацией в анализируемом районе, оценивали по формуле

$$\Delta P(x, y) = \overline{P_{ERA}}(x, y) R_{ERA}(x, y) \left(\Delta E_{MODIS} / \overline{E_{ERA}} \right), \quad (4)$$

где $\overline{E_{ERA}}$ и $\overline{P_{ERA}}(x, y)$ – средняя для анализируемого района эвапотранспирация и среднее распределение в нем атмосферных осадков; ΔE_{MODIS} – изменение средней эвапотранспирации в анализируемом районе в результате мелиорации; R_{ERA} – индекс рециркуляции осадков. Нижние индексы «ERA» и «MODIS» у множителей в формуле (4) указывают на источник данных, используемых для их вычисления.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим результаты численного моделирования средних за вегетационный период значений метеорологических параметров и их изменений в результате мелиорации. Метеорологические поля рассчитывали на основе мезомасштабной модели WRF при исходном состоянии подстилающей поверхности в модельном регионе (условия до мелиорации) и при замене в модели класса земель «пахотные земли» на классы «широколиственные леса» или «переувлажненные земли» (условия после мелиорации). Климатические последствия мелиорации оценивали по разности средних за рассматриваемый период метеорологических полей, рассчитанных при исходной и преобразованной структуре подстилающей поверхности. Результаты моделирования для приземной температуры воздуха приведены на рис. 1.

В обоих рассматриваемых сценариях мелиорации отмечается понижение средней температуры воздуха на мелиорируемой территории. Однако это понижение сравнительно невелико: для дневных температур – до 0,4 °C, для среднесуточных – до 0,3 °C.

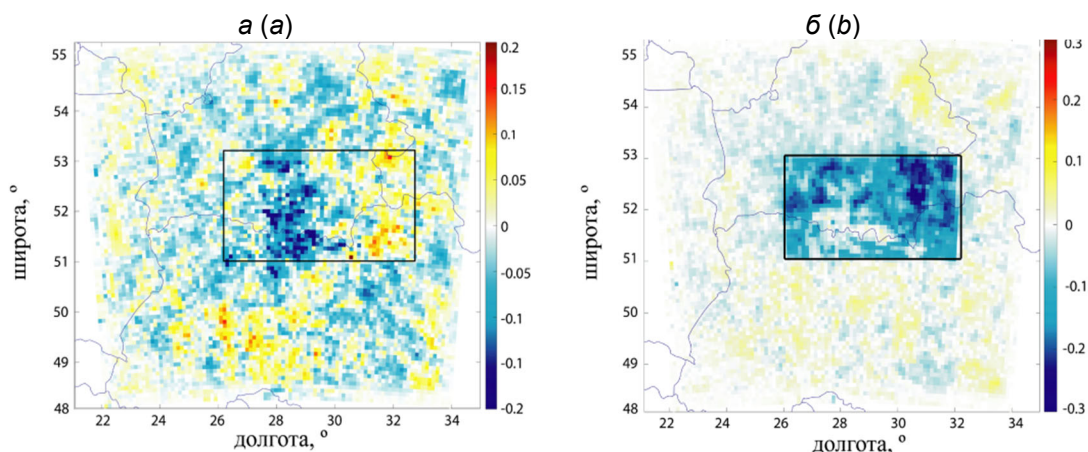


Рис. 1. Изменения средней температуры воздуха (°C) на высоте 2 м, рассчитанные для вегетационного периода 2015 г. на основе модели WRF при двух сценариях мелиорации в регионе Белорусского Полесья (выделен боксом): а – заболачивание; б – облесение

Fig. 1. Changes in average air temperature (°C) at 2 m altitude calculated for the growing season of 2015 using WRF model under two melioration scenarios in Belarusian Polesie region (highlighted by a box): a – re-swamping; b – reforestation

Максимальное понижение среднесуточной температуры воздуха при заболачивании земель на мезомасштабном уровне составляет около $0,2^{\circ}\text{C}$, что согласуется с оценками на основе спутниковых данных (рис. 2). Оценки получены на основе данных спутникового прибора MODIS за 2000–2023 гг., осредненных за вегетационный период с марта по сентябрь.

В сценарии замены в модели класса земель «пахотные земли» (категория «Cultivated and managed vegetation / agriculture» в глобальной классификации земной поверхности GLC2019) на класс земель «травянистые водно-болотные угодья» (категория «Herbaceous wetland») максимальное уменьшение среднесуточной температуры подстилающей поверхности (LST) в административных районах Гомельской области составило $0,49^{\circ}\text{C}$. Для пересчета этого значения в соответствующее изменение температуры воздуха на высоте 2 м ($T_{2\text{m}}$) необходимо рассмотреть связь между изменениями LST и $T_{2\text{m}}$. В связи с этим рассчитаны линейные тренды изменений средних за вегетационный период значений LST и $T_{2\text{m}}$ для периода 2000–2023 гг. Карта отношения трендов LST и $T_{2\text{m}}$ для территории Гомельской области представлена на рис. 3. Видно, что рост LST в данном регионе существенно опережает рост температуры воздуха. Это означает, что к парниковому потеплению в данном регионе добавляются другие факторы, ускоряющие рост LST. В первую очередь это связано с уменьшением влажности и теплоемкости почвы, что особенно заметно на землях сельскохозяйственного назначения, на которые приходится максимум отношения трендов LST и $T_{2\text{m}}$. Рост температуры таких земель происходит в 2–4 раза быстрее, чем рост температуры воздуха.

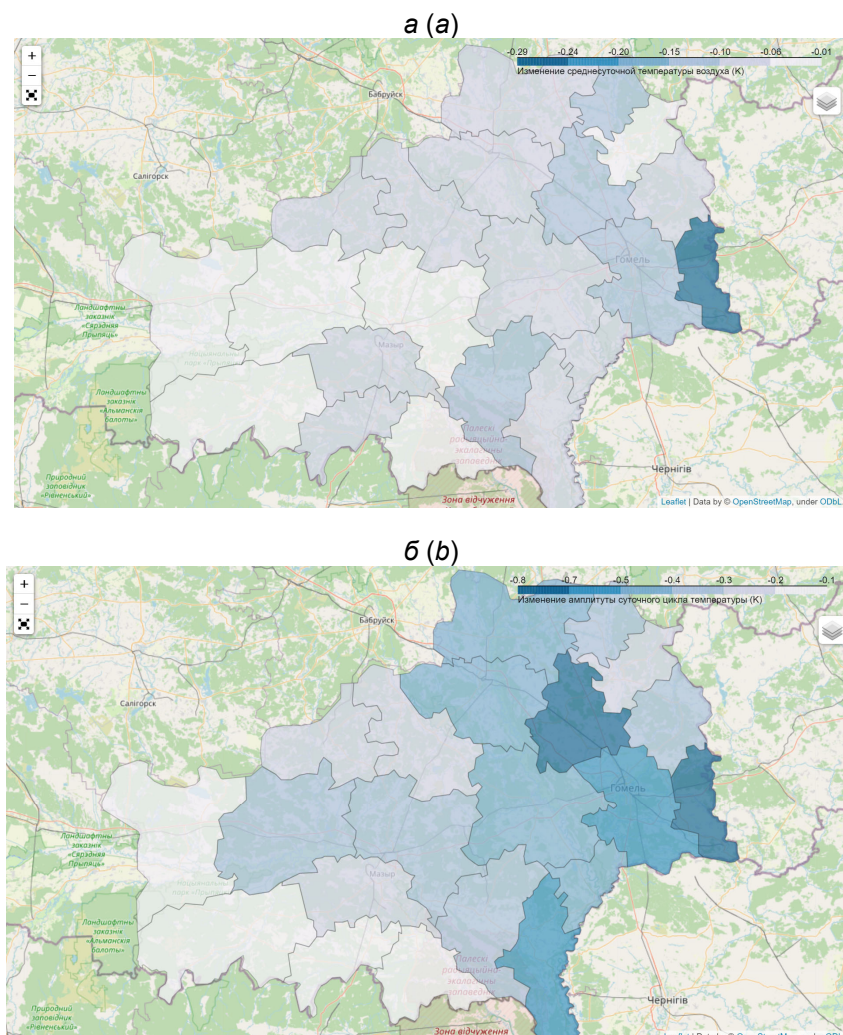


Рис. 2. Оценки по данным дистанционного зондирования Земли изменений среднесуточной температуры воздуха (а) и амплитуды суточного цикла температуры (б) в районах Гомельской области для сценария повторного заболачивания земель

Fig. 2. Estimations of changes in average daily temperature of Earth remote sensing data (a) and amplitude of diurnal temperature cycle (b) under the re-swamping scenario in administrative districts of Homiel region using remote sensing data

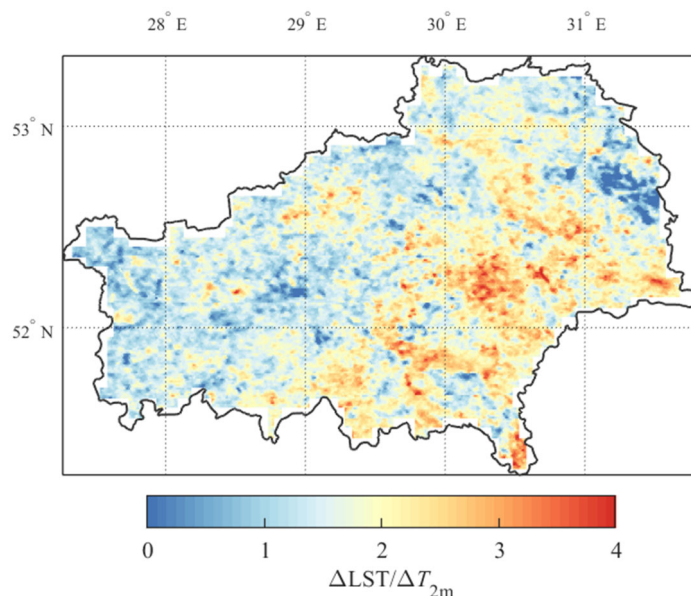


Рис. 3. Отношение трендов температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха на высоте 2 м для территории Гомельской области

Fig. 3. Ratio of trends of land surface temperature to air temperature at 2 m altitude for Homiel region

Среднее отношение трендов LST и T_{2m} для Гомельской области составляет примерно 1,69 и позволяет пересчитать оценки изменения LST в районах Гомельской области в результате заболачивания в соответствующие изменения T_{2m} . Полученные результаты представлены на рис. 2, а. Максимальное уменьшение температуры воздуха в районах Беларуси, оцененное таким образом, составляет 0,29 °C. Более существенным в данном сценарии мелиорации является изменение амплитуды суточного цикла температуры воздуха до 0,8 °C (рис. 2, б), что также согласуется с результатами численного моделирования.

Аналогичным способом на основе данных ДЗЗ получены оценки изменения среднесуточной температуры воздуха и амплитуды ее суточного цикла для сценария облесения пахотных земель. Соответствующие результаты представлены на рис. 4.

Максимальное уменьшение среднесуточной температуры воздуха наблюдается на востоке области и составляет примерно 0,23 °C. Эта оценка достаточно неплохо согласуется с расчетами на основе мезомасштабной численной модели WRF, согласно которым максимальное уменьшение среднесуточной температуры в вегетационный период для рассматриваемого сценария составляет 0,29 °C.

Максимальное изменение амплитуды суточного цикла T_{2m} в сценарии мелиорации с облесением земель составляет –0,85 °C согласно расчетам на основе модели WRF и –1,4 °C согласно расчетам на основе данных ДЗЗ.

Рассмотрим теперь оценки изменения скрытого потока тепла на мелиорируемой территории. Соответствующие результаты численного моделирования для двух рассматриваемых сценариев представлены на рис. 5. Оценки на основе данных ДЗЗ приведены на рис. 6. В численном эксперименте с заболачиванием земель наблюдается малозначительное увеличение испарения – скрытый поток тепла (LH) в мелиорируемом регионе увеличивается на 0,15 Вт/м². Примерно такую же величину его увеличения – 0,24 Вт/м² – дают расчеты на основе данных ДЗЗ.

Более существенное увеличение потока скрытого тепла – максимально на 1,0–1,5 Вт/м² – наблюдается в численном эксперименте с облесением земель. Эти оценки превосходно согласуются с расчетами на основе данных ДЗЗ: среднее увеличение LH в мелиорируемом регионе составляет 0,68 согласно результатам численного моделирования и 0,60 согласно расчетам на основе данных ДЗЗ.

Таким образом, проверка результатов численного моделирования климатических последствий мелиорации независимым методом подтверждает достоверность полученных оценок. Два совершенно разных метода моделирования влияния мелиорации на климат дают очень близкие оценки изменения метеорологических величин. Согласно представленным результатам, при заболачивании земель максимальное понижение среднесуточной температуры на мезомасштабном уровне составит 0,2–0,3 °C, максимальное изменение потока скрытого тепла – около +0,66 Вт/м², что соответствует увеличению месячного испарения на 6,1 мм. Перепады температуры на протяжении суток в результате заболачивания уменьшаются в среднем на 0,8 °C, что сделает климат мелиорированных земель более умеренным.

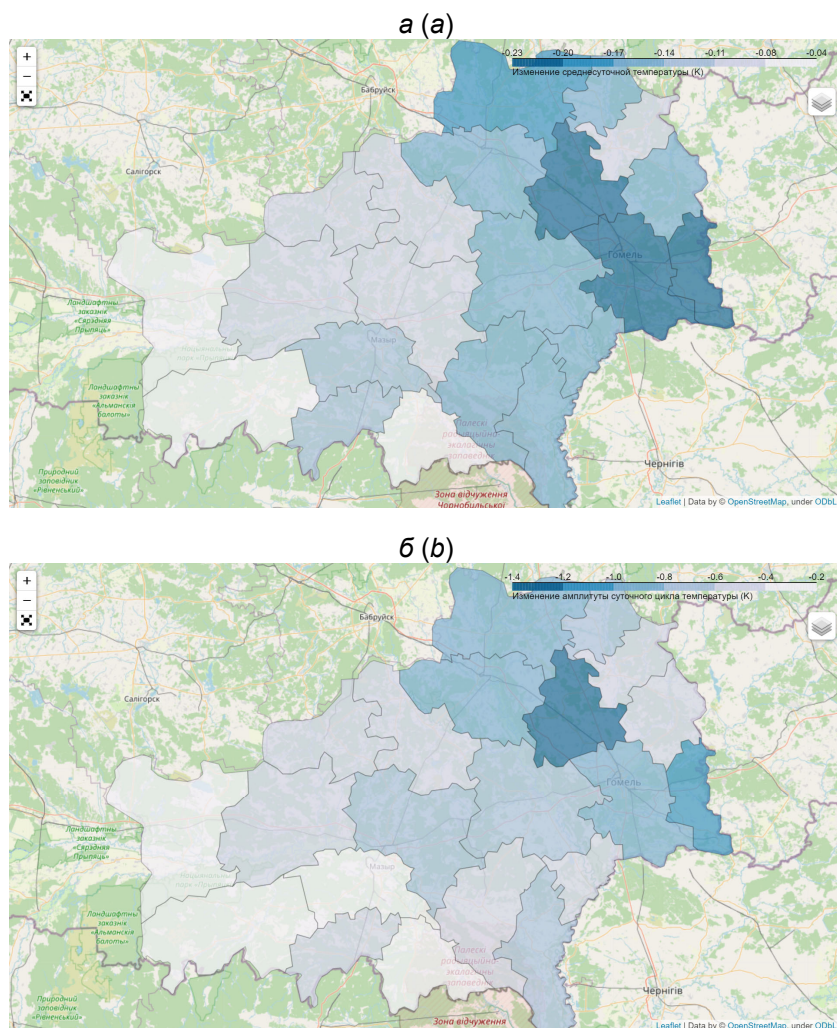


Рис. 4. Оценки по данным дистанционного зондирования Земли изменений среднесуточной температуры воздуха (а) и амплитуды суточного цикла температуры (б) в районах Гомельской области для сценария мелиорации с облесением земель

Fig. 4. Estimations of changes in average daily temperature of Earth remote sensing data (a) and amplitude of diurnal temperature cycle (b) under the reforestation melioration scenario in administrative districts of Homiel region using remote sensing data

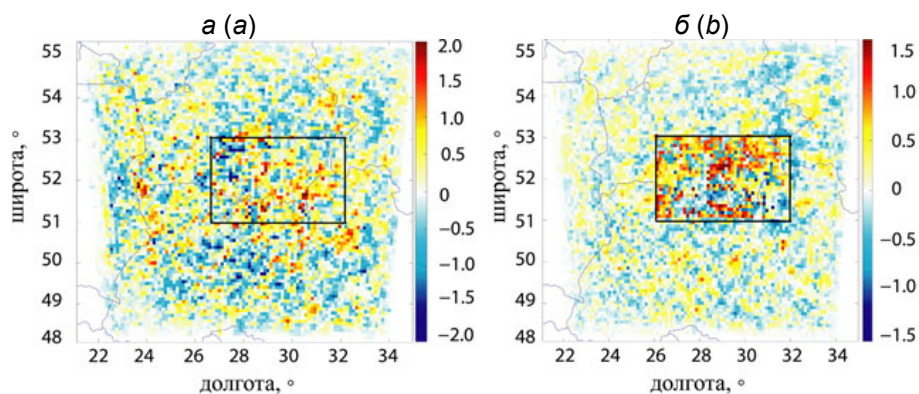


Рис. 5. Изменения среднего потока скрытого тепла LH ($\text{Вт}/\text{м}^2$), рассчитанные для вегетационного периода 2015 г. на основе модели WRF при двух сценариях мелиорации в регионе Белорусского Полесья (выделен боксом): а – заболачивание; б – облесение

Fig. 5. Changes in latent heat flux LH (W/m^2) calculated for the growing season of 2015 using WRF model under two melioration scenarios in Belarusian Polesie region (highlighted by a box): a – re-swamping; b – reforestation

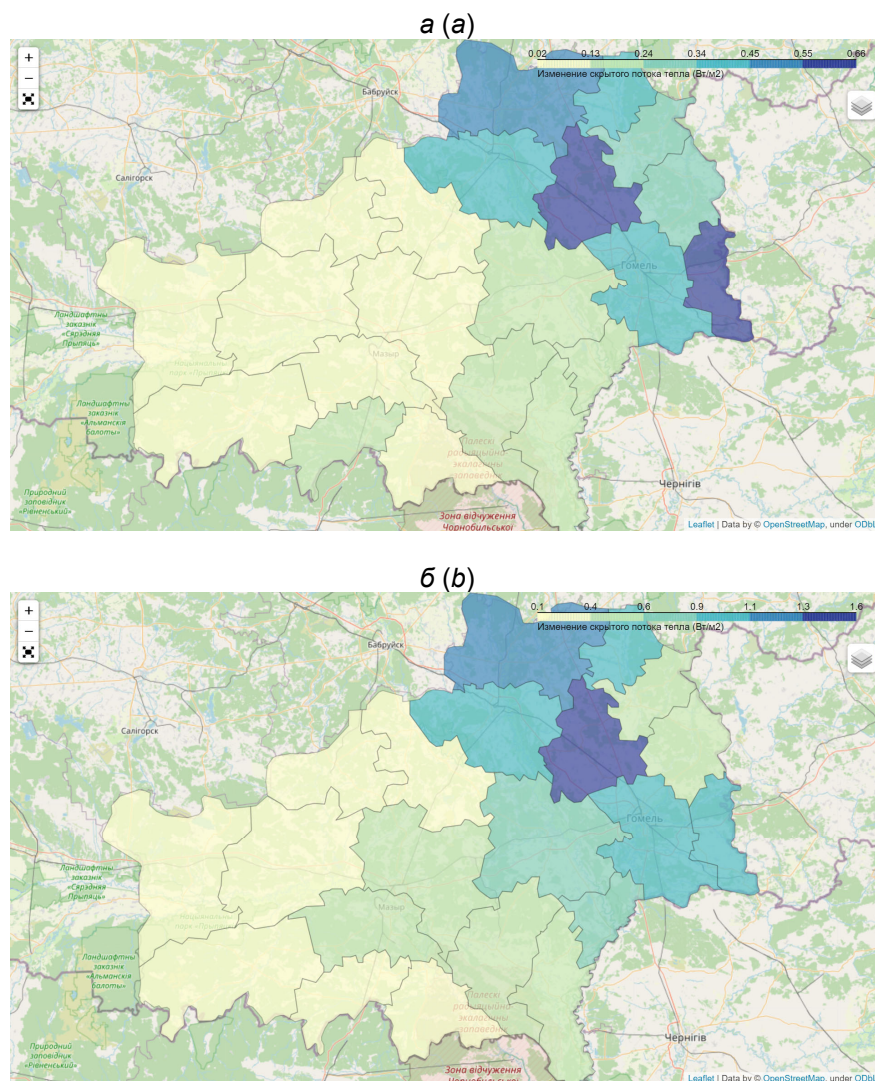


Рис. 6. Оценки по данным дистанционного зондирования Земли изменений скрытого потока тепла в районах Гомельской области для сценариев мелиорации с заболачиванием (а) и облесением (б) земель

Fig. 6. Estimations of changes in latent heat flux under the scenarios of waterlogging (a) and reforestation (b) of arable lands of Earth remote sensing data in administrative districts of Homiel region using remote sensing data

Процесс увеличения лесистости приведет к понижению среднесуточной температуры воздуха на $0,23\text{--}0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ с максимальным эффектом на востоке Гомельской области. Амплитуда суточного цикла температуры в результате увеличения лесистости уменьшится на $0,85\text{--}1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поток скрытого тепла, обеспечивающий охлаждение земной поверхности в вегетационный период, увеличится максимально на $1,5\text{--}1,6\text{ Вт/м}^2$, что соответствует величине месячного испарения $13,6\text{--}14,7\text{ мм}$.

Что касается атмосферных осадков, то значимых тенденций их изменений на мелиорируемых землях не выявлено ни в одном из выполненных численных экспериментов. Мезомасштабное метеорологическое моделирование показывает отсутствие значимых изменений общей и конвективной облачности в рассматриваемом регионе. Это свидетельствует о том, что преобразование подстилающей поверхности в регионе Белорусского Полесья не вызывает заметных изменений характеристик конвекции в пограничном слое атмосферы. Таким образом, можно сделать вывод, что конвективные движения в рассматриваемом регионе главным образом стимулируются крупномасштабными восходящими движениями и притоком влаги в результате ее горизонтальной адвекции. Для оценки влияния на атмосферные осадки притока влаги в результате ее испарения с земной поверхности использовали описанный выше метод расчета рециркуляции осадков. На первом этапе на основе уравнений (3) и реанализа

ERA5 рассчитывали вклад испарения на мелиорируемой территории в пространственное распределение атмосферных осадков. Далее, на основании данных спутниковых изменений и приведенных выше оценок изменений эвапотранспирации в районах Беларуси при различных сценариях мелиорации, рассчитывали вклад каждого района в сумму атмосферных осадков и их кумулятивный вклад в распределение осадков на исследуемой территории.

Изменение поля атмосферных осадков, рассчитанное для летнего сезона 2023 г. в сценарии увеличения лесистости Гомельской области, представлено на рис. 7. Нужно отметить, что данному сценарию соответствуют наибольшее увеличение эвапотранспирации в мелиорируемом регионе, поэтому он является показательным в части влияния мелиорации на атмосферные осадки. Летний период года, взятый для демонстрации этого влияния, также является показательными, поскольку для него в наибольшей степени проявляется влияние мезомасштабной конвекции на процессы формирования облаков и осадков.

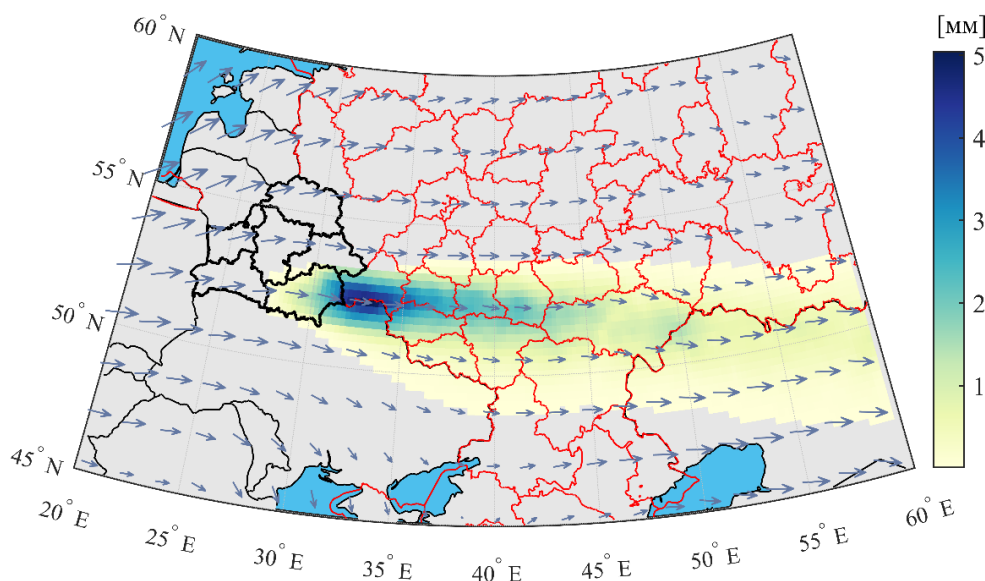


Рис. 7. Изменение поля атмосферных осадков в летний период 2023 г. в сценарии увеличения лесистости Гомельской области

Fig. 7. Changes in atmospheric precipitation field in summer of 2023 under the scenario of reforestation in Homel region

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что влияние мелиорации на атмосферные осадки сравнительно невелико – меньше 2 % от нормы, что подтверждает выводы, сделанные на основании мезомасштабного моделирования. За счет западного переноса пространственное распределение осадков, сформированных в результате местного испарения, вытянуто на восток и простирается далеко за пределы мелиорируемого региона. Для ближайших к Беларуси территорий Российской Федерации количество осадков в рассматриваемых сценариях мелиорации может измениться не более чем на 1 % от нормы.

Выводы.

1. Полученные оценки климатических последствий мелиорации на территории Белорусского Полесья дают достаточно полное представление о возможностях антропогенного регулирования климата на региональном уровне и о целесообразности реализации тех или иных мер в части смягчения негативных последствий его изменений.

2. Климатический эффект мелиорации достигается главным образом за счет изменений альбедо, эвапотранспирации и шероховатости подстилающей поверхности, которые в совокупности влияют на радиационный и тепловой балансы подстилающей поверхности, конвективные процессы в планетарном пограничном слое атмосферы, облачность и осадки.

3. Лесонасаждение и повторное заболачивание выработанных торфяников, предусматриваемые в Национальных планах и стратегиях адаптации к изменению климата, помимо очевидного предотвращения процессов деградации земель способны оказать ряд положительных эффектов на микроклимат, гидрологический и углеродный балансы. Так, в наиболее уязвимых перед изменением климата южных районах Беларуси рекультивация земель повлечет изменение целого ряда метеорологических показателей: в теплый период года суммарное испарение возрастет на 3–5 мм/месяц, что

соответствует увеличению потока скрытого тепла с подстилающей поверхности на 1–2 Вт/м²; поток явного тепла с подстилающей поверхности уменьшится на 1–3 Вт/м², а средняя температура воздуха понизится в пределах 0,5 °С.

4. Увеличение лесистости на мезомасштабном уровне приведет к понижению среднесуточной температуры воздуха на 0,2–0,3 °С с максимальным эффектом на востоке Гомельской области. Амплитуда суточного цикла температуры в результате увеличения лесистости сократится на 0,9–1,4 °С, а среднемесячное испарение в вегетационный период увеличится максимально на 14 мм.

Список использованных источников

1. Лысенко, С. А. Особенности современного изменения климата в Республике Беларусь / С. А. Лысенко, И. В. Буюков // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2020. – № 3. – С. 22–41.
2. 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.
3. Изменения климата Беларуси и их последствия / В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск : Тонпик, 2003. – 330 с.
4. Шебеко, В. Ф. Влияние осушительных мероприятий на водный режим территорий / В. Ф. Шебеко. – Минск : Ураджай, 1983. – 200 с.
5. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // *Изв. Рос. акад. наук. Сер. географическая*. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
6. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // *Исследование Земли из космоса*. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
7. 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.
8. 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.
9. Костин, С. И. Климатология / С. И. Костин, Т. В. Покровская. – Л. : Гидрометеиздат, 1961. – 235 с.
10. Рахманов, В. В. Гидроклиматическая роль лесов / В. В. Рахманов. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 240 с.
11. Федоров, С. Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне европейской территории СССР / С. Ф. Федоров. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 264 с.
12. Изменение структуры водного и теплового баланса залесенных территорий под влиянием вырубок / С. Ф. Федоров [и др.] // *Труды Государственного гидрологического института*. – 1981. – Вып. 279. – С. 20–31.
13. Широков, В. М. Изменение микроклимата побережий и акваторий водохранилищ в пригородных зонах Беларуси / В. М. Широков, П. С. Лопух // *Климатические ресурсы Беларуси и их рациональное использование*. – Минск : Университетское, 1986. – С. 88–93.
14. Лихацевич, А. П. Мелиорация земель в Беларуси / А. П. Лихацевич, А. С. Мееровский, Н. К. Вахонин. – Минск : БелНИИМЛ, 2001. – 308 с.
15. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия / А. В. Ольчев [и др.] // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2017. – Т. 4. – С. 79–101.
16. Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model / X. Li [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2018. – Vol. 103. – P. 115–126.
17. Brubaker, K. Estimation of Continental Precipitation Recycling / K. Brubaker, D. Entekhabi, P. S. Eagleson // *J. Clim.* – 1993. – Vol. 6, № 6. – P. 1077–1089.
18. The contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East Asian precipitation and its variability / L. Guo [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2018. – Vol. 51, № 1–2. – P. 4139–4156.
19. Eltahir, E. A. B. Precipitation recycling in the Amazon basin / E. A. B. Eltahir, R. L. Bras // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* – 1994. – Vol. 120, № 518. – P. 861–880.

References

1. Lysenko S. A., Buyakov I. V. *Osobennosti sovremennogo izmeneniya klimata v Respublike Belarus'* [The key features of the current climate change in the Republic of Belarus]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2020, no. 3, pp. 22–41 (in Russian).
2. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya, 2-e izd.* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and regulatory opportunities. 2nd ed.]. Minsk, Enciklopediks Publ., 2020, 264 p. (in Russian).
3. Loginov V. F., Sachok G. I., Mikutsky V. S., Mel'nik V. I., Kolyada V. V. *Izmeneniya klimata Belarusi i ih posledstviya* [Climate change in Belarus and its consequences]. Minsk, Tonpik Publ., 2003, 330 p. (in Russian).
4. Shebeko V. F. *Vliyaniye osushitel'nykh meropriyatiy na vodnyy rezhim territoriy* [Effect of drainage measures on water regime of territories]. Minsk, Uradzhay Publ., 1983, 200 p. (in Russian).

5. Loginov V. F., Lysenko S. A., Homich V. S., Semenchenko V. P., Kulak A. V., Stepanovich I. M. *Priznaki aridizatsii klimata i ih ekosistemnye proyavleniya na territorii Belarusi* [Climate aridization signs and their ecosystem displays on the territory of Belarus]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = Bulletin of RAS. Geography*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 515–527 (in Russian).
6. Lysenko S. A. *Klimatoobuslovlennyye izmeneniya bioproduktivnosti nazemnykh ekosistem Belarusi* [climate-related changes in bioproductivity of terrestrial ecosystems in Belarus]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Research of Earth from space*, 2019, no. 6, pp. 77–88 (in Russian).
7. Lysenko S. A., Zaiko P. O., Loginov V. F. *Vliyanie izmeneniy klimata na bioproduktivnost' nazemnykh ekosistem v Belorussko-Ukrainskom Poles'e* [Climate change impacts on bioproductivity of terrestrial ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie region]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2022, vol. 47, no. 1, pp. 59–71 (in Russian).
8. Lysenko S. A., Loginov V. F., Bondarenko Yu. A. *Vzaimosvyaz' sovremennykh izmeneniy ispareniya i kolichestva osadkov v yuzhnykh regionakh Belarusi* [Relationship of modern changes in evaporation and number of precipitations in the southern regions of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 20–29 (in Russian).
9. Kostin S. I., Pokrovskaya T. V. *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 235 p. (in Russian).
10. Rahmanov V. V. *Gidroklimaticheskaya rol' lesov* [Hydroclimatic role of forests]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984, 240 p. (in Russian).
11. Fedorov S. F. *Issledovanie elementov vodnogo balansa v lesnoy zone evropeyskoy terriorii SSSR* [Study of water balance elements in the forest zone of European territory of USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 235 p. (in Russian).
12. Fedorov S. F., Marunoch S. F., Burov A. S., Ral'cevic N. D. *Izmenenie struktury vodnogo i teplovogo balansa zalesennykh territorii pod vliyaniem vyrubok* [Changes of water and heat balance structure of forested territories under the effect of deforestation]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta = Proc. of the State hydrology institute*, 1981, vol. 279, pp. 20–31 (in Russian).
13. Shirokov V. M., Lopuh P. S. *Izmenenie klimata poberezhnykh i akvatoriy vodohranilishch v prirodnnykh zonakh Belarusi* [Change in the microclimate of shorelines and water areas of reservoirs in nature zones of Belarus]. *Klimaticheskie resursy Belarusi ii ih racional'noe ispol'zovanie = Climate resources of Belarus and their rational use*. Minsk, Universitetskoe Publ., 1986, pp. 88–93 (in Russian).
14. Lihacevich A. P., Meerovskiy A. S., Vahonin N. K. *Melioratsiya zemel' v Belarusi* [Land melioration in Belarus]. Minsk, BelNIIMiL Publ., 2001, 308 p. (in Russian).
15. Ol'chev A. V., Rozinkina I. A., Kuz'mina E. V., Nikitin M. A., Rivin G. S. *Ocenka vliyaniya izmeneniya lesistosti central'nogo regiona Vostochno-Evropeyskoy ravniny na letnie pogodnye usloviya* [Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European plain]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2017, vol. 4, pp. 79–101 (in Russian).
16. Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q. Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, vol. 103, pp. 115–126.
17. Brubaker K., Entekhabi D., Eagleson P. S. Estimation of Continental Precipitation Recycling. *J. Clim.*, 1993, vol. 6, no. 6, pp. 1077–1089.
18. Guo L., Klingaman N. P., Demory M. E., Vidale P. L., Turner A. G., Stephan C. C. The contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East Asian precipitation and its variability. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 51, no. 1–2, pp. 4139–4156.
19. Eltahir E. A. B., Bras R. L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1994, vol. 120, no. 518, pp. 861–880.

Информация об авторах

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

Зайко Полина Олеговна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: polly_lo@tut.by

Information about the authors

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

Polina O. Zaiko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: polly_lo@tut.by

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ОБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

С. А. Лысенко, П. О. Зайко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлена комплексная геоинформационная система повышения оправдываемости гидродинамического прогноза погоды, включающая актуализированные и оперативно обновляемые на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) пространственные распределения физических параметров подстилающей поверхности, адаптированные для территории Беларуси наборы параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба и блоки усвоения данных наземных метеорологических, аэрологических и радиолокационных наблюдений. Показано, что усвоение данных метеорологических и аэрологических станций позволяет уменьшить вероятность абсолютных ошибок прогноза приземного давления ≥ 3 ГПа на 5 %. Усвоение радиолокационных данных сокращает среднеквадратическую ошибку прогноза скорости приземного ветра на 0,33–0,74 м/с при заблаговременности в пределах 24 ч и позволяет более точно спрогнозировать территориальное распределение конвективных систем и области выпадения осадков на ранних часах прогноза (до 12 ч). Уточнение структуры землепользования и параметров подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых данных обеспечивает повышение оправдываемости краткосрочного гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси на 4–9 % с максимальным проявлением в Минской, Гомельской и Гродненской областях в холодный период года.

Ключевые слова: численный прогноз погоды; гидродинамическое моделирование; WRF; параметризация атмосферных процессов; усвоение данных; доплеровский метеорологический радиолокатор; дистанционное зондирование Земли.

Для цитирования. Лысенко С. А., Зайко П. О. Геоинформационная система повышения оправдываемости гидродинамического прогноза погоды для территории Беларуси на основе данных дистанционного зондирования Земли и объективного анализа метеорологических полей // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 30–40.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR HYDRODYNAMIC WEATHER FORECAST ACCURACY INCREASING FOR BELARUSIAN TERRITORY BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA AND THE OBJECTIVE ANALYSIS OF METEOROLOGICAL FIELDS

S. A. Lysenko, P. O. Zaiko

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

Abstract. The article presents a complex geoinformation system for the validity of hydrodynamic weather forecasts improving, including updated and promptly updated on the basis of the remote sensing data spatial distributions of the physical parameters of the underlying surface, the sets of the parameterizations of atmospheric processes at the grid scale and blocks of the data assimilation from ground-based meteorological, aerological and radar observations adapted for the territory of Belarus. It is shown that the data assimilation of meteorological and aerological stations allows reducing the probability of absolute errors in surface pressure forecast ≥ 3 hPa by 5 %. The assimilation of radar data reduces the mean-square error of surface wind speed forecast by 0.33–0.74 m/s at an advance time within 24 h, and allows more accurate forecasting of the territorial distribution of convective systems and precipitation areas at early hours of the forecast (up to 12 h). The clarification of the land use structure and underlying surface parameters on the base of operational satellite data provides an increase in the validity of the short-term hydrodynamic forecast of surface air temperature in Belarus by 4–9 % with maximum manifestation in Minsk, Gomel and Grodno regions in the cold period of a year.

Keywords: numerical weather forecasting; hydrodynamic modeling; WRF; parameterization of atmospheric processes; data assimilation; doppler weather radar; Earth remote sensing.

For citation. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Geographic information system for hydrodynamic weather forecast accuracy increasing for Belarusian territory based on Earth remote sensing data and the objective analysis of meteorological fields. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 30–40.

Введение. Развитие современной вычислительной техники, технологий больших данных и облачных вычислений сделали задачу мезомасштабного численного моделирования погоды доступной широкому кругу специалистов. Применение современных численных методов решения уравнений гидротермодинамики атмосферы, нерегулярных вычислительных сеток и эффективных параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба позволили достичь существенного прогресса в увеличении заблаговременности численных прогнозов погоды. Расширение глобальной системы наземных и спутниковых метеорологических наблюдений, наряду с развитием технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и алгоритмов объективного анализа метеорологических полей, сделали возможным более точное и детальное описание начального состояния атмосферы, что положительно отразилось на оправдываемости краткосрочных прогнозов погоды.

Мировой опыт использования мезомасштабных численных моделей для ежедневного прогноза погоды позволил выработать некоторые общие рекомендации по ассимиляции в них данных спутниковых и наземных средств метеорологических наблюдений, выдвинуть требования к пространственному и временному разрешению моделей при прогнозировании ими неблагоприятных и опасных явлений погоды, оценить потенциальную точность краткосрочных прогнозов различных метеорологических элементов. В то же время конкретные рекомендации по конфигурации гидродинамической модели, используемым в ней параметризациям физических процессов подсеточного масштаба и алгоритмам усвоения данных, как правило, ограничиваются конкретными регионами и отдельными синоптическими ситуациями. При этом успешный опыт применения модели для определенного региона или синоптической ситуации не гарантирует успешность ее прогнозов в других регионах мира, имеющих свои климатические и ландшафтно-геофизические особенности.

Для составления прогноза состояния атмосферы с помощью численных моделей требуется предварительная оценка значений метеорологических величин в узлах расчетной сетки в начальный момент времени или в некотором начальном интервале. Такие значения получают в результате специальной процедуры усвоения моделью данных, называемой *численным анализом метеорологических полей* [1]. Наиболее распространенными методами численного анализа являются оптимальная интерполяция, трехмерная и четырехмерная вариационная ассимиляция данных, фильтр Кальмана и его ансамблевый аналог [2, 3]. Данные методы могут эффективно применяться для учета дополнительных наземных, аэрологических, радиолокационных и спутниковых данных. От качества и полноты данных о начальном состоянии атмосферы зависит точность и заблаговременность численного прогноза погоды.

В настоящей работе представлена адаптированная для территории Беларуси система численного прогноза погоды на базе мезомасштабной гидродинамической модели WRF (Weather Research and Forecasting), а также описаны основные этапы ее создания – от выбора схем параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба до оценок оправдываемости численных прогнозов метеорологических полей. Отдельно рассмотрены вопросы влияния цифровой модели подстилающей поверхности и усвоения различных типов метеорологических данных на качество краткосрочного численного прогноза погоды в различные сезоны года.

В качестве основного источника информации для системы усвоения метеорологических данных в модели WRF использованы наблюдения новых автоматизированных метеорологических станций Беларуси и трех доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) (в аэропортах городов Минска, Гомеля и Витебска), а также аэрологические наблюдения в городе Минске. Данные пункты наблюдений были введены в эксплуатацию в 2016–2020 гг. в рамках мероприятия по развитию гидрометеорологической сети Республики Беларусь государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов». Учет этих данных позволил детализировать объективную информацию о текущем состоянии атмосферы и создал предпосылки для дальнейшего повышения точности численных прогнозов погоды для территории Беларуси.

Геоинформационная система повышения оправдываемости численного прогноза погоды. С 2016 по 2023 г. в информационную среду Белгидромета Республики Беларусь последовательно внедряли компоненты геоинформационной системы повышения оправдываемости численного прогноза погоды, включающей регионально-адаптированную мезомасштабную модель WRF с оптимальным набором схем параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба, компонент усвоения данных наземных и аэрологических наблюдений, компонент усвоения данных ДМРЛ и компонент усвоения данных ДДЗ.

С целью отработки конфигурации модели и оценки успешности ее прогнозов провели четыре комплексных эксперимента по численному моделированию погодных условий на территории Беларуси, включающих прогнозирование неблагоприятных и опасных явлений погоды в различные сезоны года с различным набором схем параметризаций физических процессов (пограничный слой, конвекция, микрофизика и др.) (более 1320 случаев); прогноз метеорологических полей с усвоением дополнительных наземных и аэрологических наблюдений по территории Беларуси и Европы (более 965 случаев);

прогноз с усвоением данных ДМРЛ по территории Беларуси (40 случаев); численный прогноз метеорологических полей с различными подходами к инициализации физических параметров подстилающей поверхности в адаптированной для территории Беларуси модели WRF (150 случаев).

Численные эксперименты выполняли на базе модели WRF–ARW версий 3.7–4.3 в двух расчетных областях: внешняя (материнская) область, охватывающая всю территорию Европы с пространственным разрешением 15 км – (250 × 240) узлов, и вложенная область, покрывающая прогнозом территорию Восточной Европы с разрешением 3 км – (586 × 586) узлов. В качестве начальных и граничных условий использовали прогнозы глобальной модели GFS с пространственным разрешением 0,25° и шагом интегрирования по времени для внешней и вложенной областей 90 и 18 сек соответственно. Расчет по вертикали осуществляли на 33 уровнях до 5 гПа, заблаговременность прогноза составила +48 ч с дискретностью 1 ч.

На первом этапе создания геоинформационной системы проводили анализ влияния различных схем параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба (конвекция, микрофизика, пограничный слой атмосферы и т. д.) на прогноз опасных и неблагоприятных явлений погоды [4]. Были исследованы временные и пространственные особенности распределения ошибок прогноза метеорологических полей (приземной температуры воздуха на 2 м, давления на уровне моря, количества осадков) за четырехлетний период (2014, 2017, 2018 и 2021 г.). Численные прогнозы приземных метеорологических полей сравнивали с фактическими наблюдениями на метеорологических станциях, на основании чего выработали рекомендации по выбору наиболее успешного набора параметризаций для территории Беларуси.

В разработанном компоненте системы усвоения наземных и аэрологических наблюдений применяли метод Крессмана [5], суть которого заключается в задании области влияния каждого вносимого наблюдения на исходное метеорологическое поле. Вес отдельного наблюдения зависит от удаленности пункта наблюдений от узла модельной сетки и от радиуса его влияния. Реализованная в Белгидромете Республики Беларусь технология усвоения приземных и аэрологических наблюдений предполагала уточнение прогноза численной модели WRF за исходный срок 00 UTC за счет усвоения дополнительных наблюдений за срок 06 UTC [6].

В качестве исходных данных для усвоения использовали наблюдения наземных метеорологических (~1650 шт.) и аэрологических (~18 шт.) станций, расположенных на всей территории Европы, в том числе 52 метеорологических и 3 аэрологических станций Беларуси. В число белорусских станций, использованных для усвоения, были включены наблюдения, которые не поступают в глобальную систему телесвязи, но хранятся и доступны в климатических базах данных метеорологических наблюдений Белгидромета Республики Беларусь. Для каждой наземной станции усваивались давление на уровне моря и станции, температура воздуха и точка росы на высоте 2 м, скорость и направление ветра на 10 м; из аэрологических наблюдений в модели усваивались абсолютная высота изобарических поверхностей (1000, 850, 700, 500 гПа и др.), температура воздуха, дефицит точки росы, а также скорость и направление ветра на указанных изобарических поверхностях.

Следующий компонент геоинформационной системы включал блоки контроля, подготовки и усвоения данных горизонтальной отражаемости и радиальной скорости ветра с трех ДМРЛ («Минск-2», «Витебск», «Гомель»). Оценку его эффективности проводили на прогнозе 40 синоптических ситуаций с неблагоприятными и опасными явлениями погоды, наблюдавшимися на территории Беларуси в 2017–2020 гг.

В качестве основного метода контроля качества данных ДМРЛ использовали адаптированный двухуровневый метод удаления радиолокационных помех на основе фильтра Габелла [7]. В данном методе производится удаление помех от местных объектов (рельефа, зданий и др.), имеющих значительную пространственную неоднородность и изменчивость распределения сигнала. Второй метод предполагал контроль данных ДМРЛ на основе фильтра нечеткой логики для поляризационных характеристик (fuzzy echo classification) [8].

Основным методом усвоения данных ДМРЛ выбрали метод трехмерного вариационного усвоения (3D-VAR), суть которого заключается в минимизации квадратичного функционала с учетом ковариации фоновой ошибки прогноза и ковариации ошибки наблюдения [9]. Наблюдаемые горизонтальная отражаемость и радиальная скорость усваивались в мезомасштабную численную модель WRF через параметры содержания дождевой воды и водяного пара. Фоновые ошибки прогноза модели WRF описывали ковариационной матрицей, полученной по методу [10].

Результаты всех численных экспериментов по прогнозированию погодных условий с помощью адаптированной модели WRF проходили статистическую оценку с расчетом систематической и средней абсолютной ошибок, среднеквадратической погрешности и коэффициента корреляции Пирсона. Оценивали качество численного прогноза температуры воздуха на 2 м, давления на уровне моря, суточного количества осадков, высоты изобарических поверхностей 500, 700, 850 гПа и температуры

воздуха на них. В экспериментах с усвоением данных ДМРЛ также оценивали качество численного прогноза скорости ветра. Отдельно проводили расчет показателей оправдываемости численного прогноза приземной температуры и количества осадков по ТКП [11].

Для оценки качества прогноза осадков с усвоением радиолокационных данных рассчитывали таблицу сопряженности (доля правильных прогнозов, предупрежденность факта наличия и отсутствия события, коэффициент ложных тревог и другие характеристики). Успешность прогноза пространственного распределения зон осадков, включая их удаленность и форму, оценивали с применением объектно-ориентированного подхода «MODE» [12].

В компоненте усвоения данных ДЗЗ реализовано два подхода к инициализации параметров цифровой модели подстилающей поверхности (тип землепользования, альбедо, индекс листовой поверхности, доля поглощенной фотосинтетически активной радиации и др.) [13]. Первый – статический подход (STATIC) – предполагает для задания параметров подстилающей поверхности использовать базу данных спутниковых наблюдений GLASS (The Global Land Surface Satellite). На ее основе были рассчитаны среднемесячные геопространственные распределения сферического альбедо (включая альбедо снега и оголенной почвы в холодный период года), индекса листовой поверхности LAI, доли фотосинтетически активной радиации FAPAR за период 2000–2020 гг. [14]. Второй – динамический подход (DYNAMIC) – основан на использовании для инициализации параметров цифровой модели подстилающей поверхности ежедневно обновляемых данных спутникового спектрорадиометра MODIS [15].

Для описания в модели структуры землепользования использовали информацию на основе данных спутникового сканера высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства, представленную в базе данных Land Cover 2019 (GLC2019) [16].

Результаты и их обсуждение. Влияние каждого из описанных компонентов геоинформационной системы на качество краткосрочного прогноза погоды проводили отдельно, по мере их внедрения в информационную среду Белгидромета Республики Беларусь и расширения числа спрогнозированных случаев.

На первом этапе проводили анализ эффективности использования различных схем параметризаций физических процессов подсеточного масштаба в модели WRF. Это позволило выявить некоторые общие особенности пространственно-временного распределения ошибок прогноза метеорологических величин на территории Беларуси для холодного и теплого сезонов года.

Для холодного периода года, когда часто наблюдаются такие неблагоприятные явления, как гололед, ливневый снег и туман, наиболее успешными оказались прогнозы с применением параметризации Миллбрандта – Яу для микрофизики облаков, университета Ёнсей – для турбулентности пограничного слоя и Каина – Фритша – для конвективных процессов подсеточного масштаба [17–19]. Для летнего сезона, в котором велика вероятность развития таких неблагоприятных и опасных явлений погоды, как грозы, град, ливневые осадки и шквалы, наименьшие ошибки численного прогноза метеозадаваемых по территории Беларуси достигались с применением тех же параметризаций микрофизики облаков и пограничного слоя, что и для холодного периода года. Однако среди схем параметризаций конвективных процессов наиболее успешной оказалась схема Грелл-3D, лучше других учитывающая мелко-масштабную конвекцию. Указанный набор схем параметризаций проявил себя успешнее остальных на всех исследуемых изобарических уровнях.

В прогнозах температуры на 2 м наименьшие ошибки наблюдались при использовании параметризации пограничного слоя атмосферы QNSE: для заблаговременности +48 ч среднеквадратическая ошибка прогноза приземной температуры составила 2,5 °C, тогда как при использовании схемы университета Ёнсей – 2,57 °C. В прогнозе осадков в холодный период года указанные выше параметризации позволили повысить общую оправдываемость численного прогноза наличия осадков на 2 % (PC – 77 %), а прогноза их отсутствия – на 8 % (PODN – 75 %); увеличился процент предупрежденности факта отсутствия осадков и, как следствие, количество ложных тревог в прогнозе осадков – на 5 % (FAR – 46 %). Для летнего периода среднеквадратическая ошибка прогноза приземной температуры с применением рекомендуемых параметризаций составила для дневного (+12 ч) и ночного (+24 ч) сроков 1,76 °C и 1,83 °C соответственно, что соотносится с уровнем точности других численных моделей, используемых в мировой практике [20].

Дополнительно проводили сравнение качества численного прогноза осадков при различном пространственном разрешении области гидродинамического моделирования (15 и 3 км), так как параметризация конвекции на шаге <5 км не требуется. С увеличением пространственного разрешения общая оправдываемость прогноза осадков в летний период повышается на 5 % (до 84 %), также наблюдается сокращение показателя ложных тревог на 10 % (до 41 %). В целом для летнего периода оправдываемость прогноза осадков была выше, чем для зимнего. Для заблаговременности +24 ч предупрежденность факта отсутствия осадков составила 88 %. Полученные результаты позволяют говорить о том, что численное моделирование процессов летней конвекции напрямую (без параметризации) улучшает

показатели оправдываемости прогноза количества осадков для теплого периода года. При этом как для теплого, так и для холодного периода года наблюдается переоценка в прогнозах фактов наличия осадков.

Результаты объектно-ориентированных оценок прогнозов WRF для территории Беларуси говорят о достаточно точном воспроизведении моделью структуры и центров облачных систем. Показатель критического успеха для 25 случаев выпадения осадков (дождь, град) составил 0,56 (CSI). При этом модель в целом переоценивает площадь сильных осадков.

Оценки распределения ошибок численного прогноза метеозлементов по областям Беларуси за 2017, 2018 и 2021 г. показали, что наиболее успешными являются прогнозы температуры воздуха на 2 м для Гродненской и Брестской областей, наименее успешными – для Могилёвской и Витебской областей (рис. 1). Средняя оправдываемость прогноза приземной температуры по 36 оцениваемым месяцам при заблаговременности +24 ч составила 89,2 % для Гродненской области и 86,8 % для Брестской области, при заблаговременности +36 ч – 88,8 и 86,4 % соответственно.

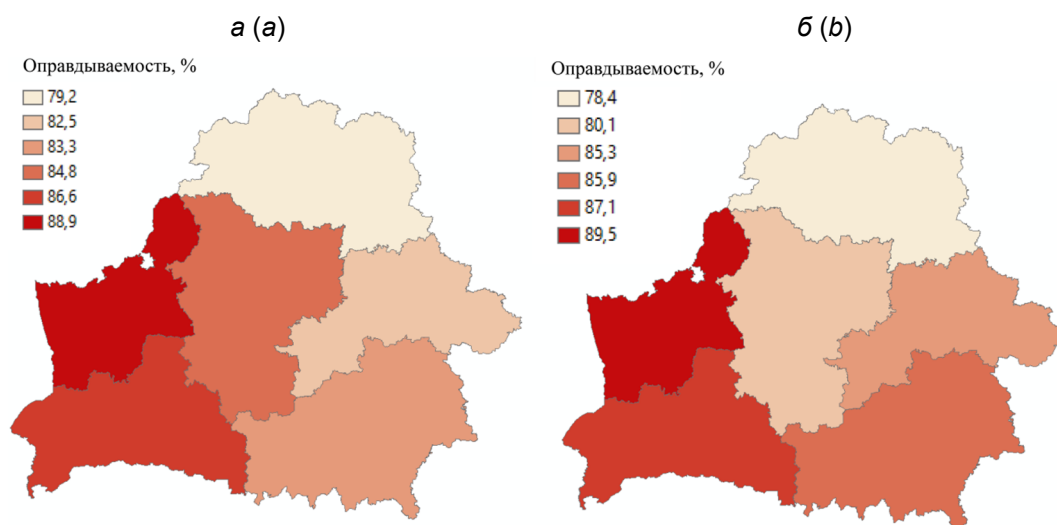


Рис. 1. Карта распределения средней оправдываемости численного прогноза приземной температуры по модели WRF по областям Беларуси с заблаговременностью +24 ч. Область расчета модели: а – 15 км; б – 3 км

Fig. 1. Map of the distribution of the average accuracy of the numerical forecast of surface temperature using the WRF model by region of Belarus with a lead time of +24 hours. Model calculation area: а – 15 km; б – 3 km

В прогнозе осадков на текущую ночь (+24 ч) наиболее высокая оправдываемость была отмечена для Витебской (90,1 %) и Могилёвской (87,3 %) областей, самая низкая оправдываемость – для Минской и Брестской областей (рис. 2). Подобное пространственное распределение ошибок прогнозов численной модели WRF может быть обусловлено как особенностями распределения среднемесячных климатических характеристик по территории страны, так и различной плотностью метеорологических станций у западных и восточных границ Беларуси.

В прогнозе на следующий день (+36 ч) наилучшее качество прогноза осадков отмечалось для Гомельской (87 %), Минской (85,7 %) и Брестской (84,3 %) областей, самая низкая оправдываемость прогнозов характерна для Могилёвской области (80,1 %).

Второй этап исследования включал серию численных экспериментов по моделированию погодных условий на территории Беларуси и Европы с усвоением в модели WRF региональных наземных и аэрологических наблюдений. Из данных наземных метеорологических станций в модель усваивались давление на уровне моря и станции, температура воздуха и точка росы на 2 м, скорость и направление ветра. Усваиваемые аэрологические данные включали абсолютные высоты стандартных изобарических поверхностей и соответствующие им значения температуры воздуха, дефицита точки росы, скорости и направления ветра на соответствующих уровнях.

Результаты эпигнозного численного моделирования погоды на территории Беларуси за 2017–2020 гг. показывают, что усвоение данных метеостанций оказывает наиболее ошутимое влияние на точность прогноза поля давления. Так, средняя вероятность ошибок прогноза приземного давления в диапазоне более 3 гПа уменьшилась на 5 %, а для изобарической поверхности 700 гПа ошибки в диапазоне 2–4 гПа сократились на 4 %.

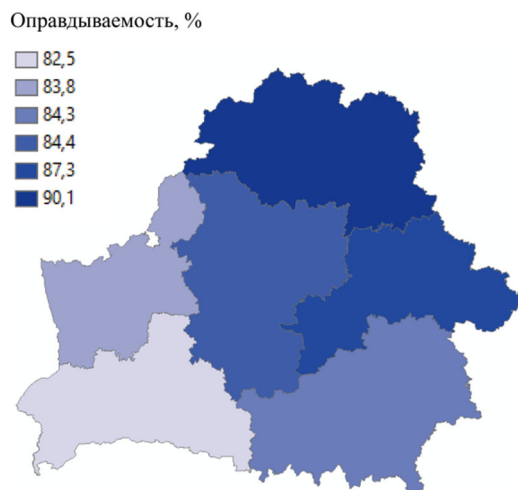


Рис. 2. Карта распределения средней оправдываемости численного прогноза осадков модели WRF по областям Беларуси с заблаговременностью +24 ч. Область расчета модели – 3 км

Fig. 2. Map of the distribution of the average accuracy of the numerical precipitation forecast of the WRF model by regions of Belarus with a lead time of +24 hours. Model calculation area – 3 km

Влияние усвоения метеоданных на качество прогноза температуры воздуха также положительно, однако менее заметно, чем для поля давления. Средняя вероятность ошибок прогноза температуры на 2 м в диапазоне 2–4 °С уменьшается на 4 %, однако абсолютные значения этого сокращения незначительны (рис. 3).

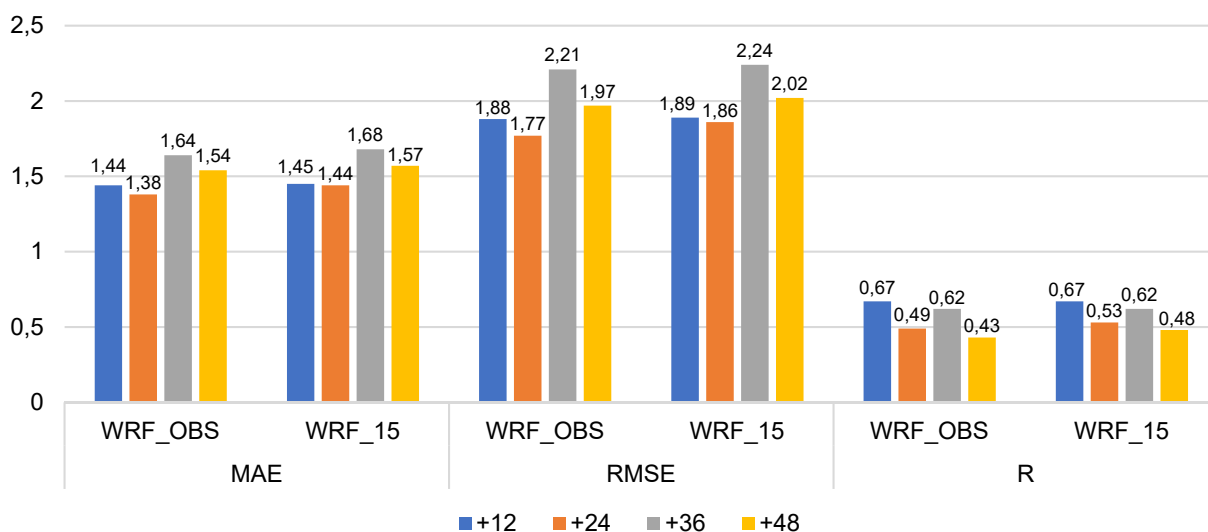


Рис. 3. Диаграммы метрик качества прогноза приземной температуры на 2 м по модели WRF с усвоением (WRF_OBS) и без усвоения (WRF_15) данных наземных и аэрологических наблюдений, 2019–2020 гг.: MAE – средняя абсолютная ошибка; RMSE – корень среднеквадратической ошибки; R – коэффициент корреляции

Fig. 3. Diagrams of quality metrics for the forecast of surface temperature at 2 m using the WRF model with assimilation (WRF_OBS) and without assimilation (WRF_15) of ground-based and aerological observation data, 2019–2020: MAE – average absolute error; RMSE – root of the standard error; R – correlation coefficient

В сравнении с базовым прогнозом численной модели WRF экспериментальный вариант прогноза с усвоением в ней данных наблюдений показал повышение показателей успешности прогноза осадков (см. таблицу), которое достигается главным образом за счет более точного прогноза факта их отсутствия.

Показатели успешности численного прогноза осадков по станциям, 2020 г., %

Success rates of numerical precipitation forecast by station, 2020, %

Сценарий	ORIG	WRF_OBS	ORIG	WRF_OBS	ORIG	WRF_OBS
	+12		+24		+36	
PC	71	76	75	79	70	73
SR	52	58	51	62	51	56
U	96	95	91	90	94	93
POD	94	92	79	80	92	90
PODN	62	68	74	79	60	65
FAR	48	42	49	38	49	44

Примечание: PC – доля правильных прогнозов; SR – коэффициент успешности; U – оправдываемость прогноза факта отсутствия явления; POD – предупрежденность факта наличия события; PODN – предупрежденность факта отсутствия события; FAR – коэффициент ложных тревог.

Note: PC – proportion of correct predictions; SR – success rate; U – justification for predicting the absence of a phenomenon; POD – warning of the fact of the event; PODN – warning of the absence of an event; FAR – false alarm coefficient.

Третья серия численных экспериментов включала моделирование 40 случаев с неблагоприятными и опасными явлениями погоды на территории Беларуси за 2017–2020 гг. с усвоением данных радиолокационной отражаемости и радиальной скорости ветра с трех ДМРЛ Беларуси. Радиолокационные данные перед их усвоением в мезомасштабной модели подвергали предварительной обработке, включающей детектирование и классификацию радиолокационных помех на основе фильтра Габелла и алгоритмов нечетной логики [8, 21].

Наиболее существенное положительное влияние усвоение радиолокационных данных оказало на качество численного прогноза скорости приземного ветра: для заблаговременности +6 ч ее среднеквадратическая ошибка уменьшилась на 0,33 м/с; для заблаговременности +12 ч – на 0,74; для заблаговременности +18 ч – на 0,45; для заблаговременности +24 ч – на 0,17 м/с. К 24-му часу прогноза влияние ассимиляции данных стало несущественным. Во всех численных экспериментах (как с усвоением, так и без усвоения радиолокационных данных) наблюдалось систематическое завышение моделью WRF скорости ветра на 10 м при значении коэффициента корреляции в пределах от 0,54 до 0,68.

В численных экспериментах с усвоением данных ДМРЛ отмечается увеличение точных прогнозов атмосферных осадков на 2 % для заблаговременности +12 ч и повышение предупрежденности факта наличия осадков на 3 %. Однако другие метрики качества прогнозов, показывающие, в частности, процент ложных прогнозов наличия или отсутствия осадков, не демонстрируют явного преимущества усвоения радиолокационных данных. Доля оправдавшихся прогнозов осадков в экспериментах с усвоением и без усвоения радиолокационных данных оказалась примерно одинаковой – 0,52–0,53.

Усвоение в модели WRF радиолокационных данных позволило более точно спрогнозировать территориальное распределение конвективных систем и центры выпадения осадков: исходный вариант прогноза позволил обнаружить 159 объектов, тогда как вариант прогноза с усвоением данных выявил 164 объекта. Точность воспроизведения центров выпадения осадков в последнем случае также оказалась выше: объекты со средней удаленностью менее 50 км с усвоением составили 22 %, без усвоения – 14 %.

Учитывая изменения структуры землепользования, природных ландшафтов и почвенно-растительного покрова под влиянием антропогенной деятельности и современных трансформаций климата, для повышения качества численных прогнозов погоды необходима регулярная актуализация параметров модели подстилающей поверхности для области прогноза. В связи с этим следующая серия численных экспериментов была направлена на оценку влияния цифровой модели подстилающей поверхности (включающей тип землепользования, почвенный покров, листовой индекс, долю поглощенной фотосинтетически активной радиации, альбедо и др.) на качество гидродинамических прогнозов для территории Беларуси.

Авторами были разработаны и реализованы (совместно с Белгидрометом Республики Беларусь) два подхода к повышению точности численных прогнозов погоды по территории Беларуси: статический (STATIC), предполагающий простую замену оригинальных наборов данных о подстилающей поверхности в системе мезомасштабного моделирования WRF на актуализированные среднемесячные данные, и динамический (DYNAMIC), в котором помимо актуализации цифровой модели подстилающей поверхности предполагается ее оперативное уточнение по мере поступления новых данных ДЗЗ.

По результатам численных экспериментов на базе модели WRF за 2021–2022 гг. оценено влияние размера и пространственного разрешения области моделирования и особенностей задания в ней

параметров подстилающей поверхности на качество численных прогнозов погоды по территории Беларуси. Установлено, что в зимний период статический способ задания параметров подстилающей поверхности позволяет уменьшить среднеквадратическую погрешность (RMSE) прогноза приземной температуры воздуха для дневных сроков +12 ч и +36 ч на 0,61 °C и 1,76 °C, а для ночных сроков +24 ч и +48 ч – на 1,46 °C и 1,98 °C соответственно (рис. 4). Коэффициент корреляции между спрогнозированными и наблюдаемыми значениями температуры в результате уточнения цифровой модели подстилающей поверхности повысился с 0,62 до 0,75, общая оправдываемость прогноза приземной температуры по ТКП возросла на 3–5 %, а для холодного периода года – на 8–11 %.

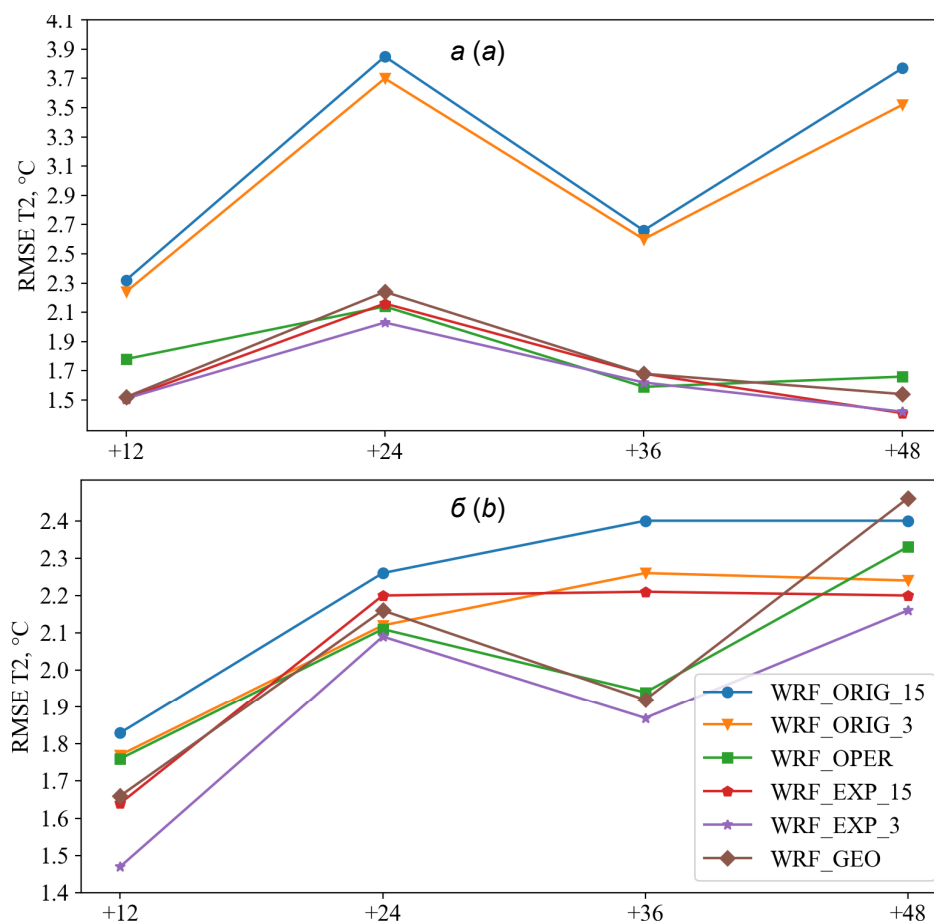


Рис. 4. Среднеквадратическая ошибка шести вариантов численного прогноза приземной температуры для холодного (а) и теплого (б) периодов 2022 г.

Fig. 4. Root-mean-square error of six variants of numerical forecast of surface temperature for cold (a) and warm (b) periods of 2022

Примечание: WRF_ORIG_15 – базовый прогноз с пространственным разрешением 15 км, включающий моделирование погодных условий по всей территории Европы с оригинальной для WRF цифровой моделью подстилающей поверхности; WRF_ORIG_3 – базовый прогноз, аналогичный WRF_ORIG_15, но с пространственным разрешением 3 км; WRF_GEO (STATIC) – моделирование погодных условий по территории Беларуси с разрешением 3 км с актуализированной цифровой моделью подстилающей поверхности; WRF_OPER (DYNAMIC) – моделирование погодных условий по территории Беларуси с разрешением 3 км и с динамическим обновлением цифровой модели подстилающей поверхности; WRF_EXP_3 (DYNAMIC) – моделирование погодных условий по всей территории Европы с разрешением 3 км и с динамическим обновлением цифровой модели подстилающей поверхности; WRF_EXP_15 (DYNAMIC) – то же, что и WRF_EXP_3, но с пространственным разрешением 15 км.

Note: WRF_ORIG_15 – basic forecast with a spatial resolution of 15 km, including modeling of weather conditions throughout Europe with an original digital model of the underlying surface for WRF; WRF_ORIG_3 – basic forecast similar to WRF_ORIG_15, but with a spatial resolution of 3 km; WRF_GEO (STATIC) – modeling of weather conditions on the territory of Belarus with a resolution of 3 km with an updated digital WRF_OPER (DYNAMIC) – modeling of weather conditions on the territory of Belarus with a resolution of 3 km and with a dynamic update of the digital model of the underlying surface; WRF_EXP_3 (DYNAMIC) – modeling of weather conditions throughout Europe with a resolution of 3 km and with a dynamic update of the digital model of the underlying surface; WRF_EXP_15 (DYNAMIC) – the same as WRF_EXP_3, but with a spatial resolution of 15 km.

Актуализация геопространственной структуры землепользования и параметров подстилающей поверхности в модели WRF также оказала положительное влияние на прогноз давления на уровне моря: среднеквадратическая ошибка для заблаговременностей +12; +24; +36 и +48 ч сократилась на 0,53; 0,78; 1,06 и 1,42 гПа соответственно. Для численного прогноза осадков наибольший положительный эффект от применения статического способа задания параметров подстилающей поверхности был отмечен для ночного времени суток (+24 ч) – общая оправдываемость повысилась на 4 % (до 85 %).

Динамическое уточнение параметров подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых данных (способ DYNAMIC) позволило сократить среднеквадратическую погрешность прогноза приземной температуры воздуха для сроков до +48 ч на 0,17–0,31 °C (по данным за 2022 г.). Максимальный эффект отмечен для холодного периода года: RMSE уменьшилась на 0,73–2,10 °C. Для 50 % промоделированных дней зимнего периода абсолютная ошибка прогноза температуры на 2 м уменьшилась на 5 °C и более относительно базового прогноза модели WRF. Общая оправдываемость прогноза температуры за 2022 г. повысилась на 4–9 %, а в холодный период года – на 6–15 %, в зависимости от заблаговременности. Как для зимнего, так и для летнего периода 2022 г. наибольшая общая оправдываемость прогноза приземной температуры воздуха отмечается в Минской, Гомельской и Гродненской областях, наименьшая – в Могилёвской и Витебской областях.

Заключение. Разработана геоинформационная система повышения оправдываемости гидро-динамического прогноза погоды для территории Беларуси, включающая блоки подготовки, контроля и усвоения данных станционных метеорологических и аэрологических наблюдений, данных радиолокационного зондирования атмосферы и ДЗЗ, а также адаптированную для региона прогноза цифровую модель подстилающей поверхности, динамически уточняемую на основе оперативных данных спутниковых наблюдений. Все компоненты системы внедрены в Белгидромете Республики Беларусь.

Оценено влияние интерполяционного и вариационного усвоения данных в мезомасштабной гидродинамической модели на оправдываемость ее краткосрочных прогнозов погоды для территории Беларуси. Показано, что:

- усвоение данных метеорологических и аэрологических станций оказывает наибольшее влияние на прогноз поля давления, позволяя уменьшить вероятность абсолютных ошибок прогноза приземного давления ≥ 3 гПа на 5 %;

- усвоение радиолокационных данных уменьшает среднеквадратическую ошибку прогноза скорости приземного ветра на 0,33–0,74 м/с при заблаговременности в пределах 24 ч, а также позволяет более точно спрогнозировать территориальное распределение конвективных систем и области выпадения осадков на ранних часах прогноза (до 12 ч).

В результате уточнения структуры землепользования и параметров подстилающей поверхности достигнуто повышение оправдываемости краткосрочного гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси на 4–9 % с максимальным проявлением в Минской, Гомельской и Гродненской областях в холодный период года.

Список использованных источников

1. Гандин, Л. С. Объективный анализ метеорологических полей / Л. С. Гандин. – Л. : Гидрометеиздат, 1963. – 287 с.
2. Investigating 3D and 4D variational rapid-update-cycling assimilation of weather radar reflectivity for a heavy rain event in central Italy [Electronic resource] / V. Mazarella [et al.] // Natural Hazards a. Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 21, iss. 9. – Mode of access: <https://nhess.copernicus.org/articles/21/2849/2021/>. – Date of access: 20.01.2022.
3. System bias correction of short-term hub-height wind forecasts using the Kalman filter / J. Xu [et al.] // Protection a. Control of Mod. Power Systems. – 2021. – Vol. 6, iss. 1. – Art. № 37.
4. Лаппо, П. О. (Зайко П. О.) Результаты верификации модели WRF–ARW в Гидромете Республики Беларусь / П. О. Лаппо (П. О. Зайко), В. Н. Шакур, М. Прохареня // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Рос. Федерации / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окруж. среды, Гидрометеорол. науч.-исслед. центр Рос. Федерации. – М., 2015. – Вып. 358 : Гидрометеорологические прогнозы. – С. 67–77.
5. Cressman, G. P. An operational objective analysis system [Electronic resource] / G. P. Cressman // Month. Weather Rev. – 1959. – Vol. 87, iss. 10. – Mode of access: https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/mwre/87/10/1520-0493_1959_087_0367_aooas_2_0_co_2.pdf. – Date of access: 01.06.2020).
6. Зайко, П. О. Система усвоения наземных и аэрологических наблюдений в мезомасштабную численную модель WRF–ARW в Белгидромете / П. О. Зайко // Природные ресурсы. – 2019. – № 1. – С. 88–95.
7. Crisologo, I. Polarimetric rainfall retrieval from a C-Band weather radar in a tropical environment (The Philippines) / I. Crisologo // Asia-Pacific J. of the Atmospheric Sciences. – 2014. – Vol. 50, iss. 1. – P. 595–607.
8. Bringi, V. N. Polarimetric doppler weather radar: principles and applications / V. N. Bringi, V. Chandrasekar. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2001. – XXV, 636 p.

9. Новая технология объективного анализа на основе схемы 3D-VAR / М. Д. Цырульников [и др.] // Информационный сборник / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окруж. среды, Гидрометеорол. науч.-исслед. центр Рос. Федерации. – [М. ; Обнинск], 2012. – № 39 : Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – С. 7–14.
10. Inhomogeneous background error modeling for WRF-var using the NMC method / H. Wang [et al.] // J. of Appl. Meteorology a. Climatology. – 2014. – Vol. 53, iss. 10. – P. 2287–2309.
11. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения : ТКП 17. 10-06-2008 (02120) : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окруж. среды Респ. Беларусь 31.10.08 : введ. 01.01.09. – Минск : Минприроды БелНИЦ «Экология», 2008. – IV, 30 с.
12. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program / C. A. Davis [et al.] // Weather a. Forecasting. – 2009. – Vol. 24, iss. 5. – 1252–1267.
13. Лысенко, С. А. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 4. – С. 50–68.
14. A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies / S. Liang, X. Zhao, S. Liu [et al.] // Intern. J. of Digital Earth. – 2013. – Vol. 6, iss. suppl. 1. – P. 5–33.
15. Лысенко, С. А. Повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси с использованием оперативных спутниковых данных / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 86–98.
16. Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy" [Electronic resource]: Moderate Dynamic Land Cover 100 m, version 3 : algorithm theoretical basis document / M. Buchhorn [et al.]. – [S. l. : s. n.], 2020. – Mode of access: <https://zenodo.org/record/4723924#.Y4YJTXbP2Uk>. – Date of access: 03.04.2021).
17. Milbrandt, J. A. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II : A proposed three-moment closure and scheme description / J. A. Milbrandt, M. K. Yau // J. of the Atmospheric Sciences. – 2005. – Vol. 62, iss. 9. – P. 3065–3081.
18. Kain, J. S. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme / J. S. Kain, J. M. Fritsch ; ed. by K. A. Emanuel, D. J. Raymond // The representation of cumulus convection in numerical models. – Boston, 1993. – Chap. 16. – P. 165–170.
19. Grell, G. A. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques / G. A. Grell, D. Dévényi // Geophys. Research Letters. – 2002. – Vol. 29, iss. 14. – Art. № 1693.
20. Баров, А. Н. Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза приземной температуры воздуха и влажности / А. Н. Баров, Ф. Л. Быков, В. А. Гордин // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 8. – С. 5–18.
21. Зайко, П. О. Совершенствование мезомасштабного численного прогнозирования погоды WRF-ARW в Республике Беларусь путем ассимиляции радиолокационных данных о ветре и отражаемости / П. О. Зайко, А. Н. Красовский, С. К. Бородко // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. – 2020. – № 2. – С. 3–13.

References

1. Gandin L. S. *Obektivnyi analiz meteorologicheskikh polei* [Objective analysis of meteorological fields]. Leningrad, Gidrometizdat, 1963, 287 p. (in Russian)
2. Mazzarella V., Ferretti R., Picciotti E., Marzano F. S. Investigating 3D and 4D variational rapid-update-cycling assimilation of weather radar reflectivity for a heavy rain event in central Italy. *Natural Hazards a. Earth System Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 9. Available at: <https://nhess.copernicus.org/articles/21/2849/2021/> (access January 20, 2022).
3. Xu J., Xiao Z., Lin Z., Li M. System bias correction of short-term hub-height wind forecasts using the Kalman filter. *Protection a. Control of Mod. Power Systems*, 2021, vol. 6, iss. 1, art. № 37.
4. Lapo P. O. (Zaiko P. O.), Shakur V. N., Proharenai M. P. *Resultaty verifikatsii modeli WRF-ARW v Hydromet Respubliki Belarus* [Verification of WRF-ARW model in Hydromet of the Republic of Belarus]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii* [Proc. of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]. *Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushej sredy, Gidrometeorologicheskij nauchno-issledovatel'skij centr Rossijskoj Federacii* [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]. 2015, iss. 358, pp. 67–77. (in Russian)
5. Cressman G. P. An operational objective analysis system. *Month. Weather Rev.*, 1959, Vol. 87, iss. 10. Available at: https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/mwre/87/10/1520-0493_1959_087_0367_aoas_2_0_co_2.pdf (accessed June 1, 2020).
6. Zaiko P. O. *Sistema ucvoenia nazemnich i aerologicheskikh nabludenii v mezomostabny cheslenny model WRF-ARW v Belgidromete* [System for assimilation of ground-based and aerological observations into the mesoscale numerical model WRF-ARW at Belhydromet]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2019, no. 1, pp. 88–95. (in Russian)
7. Crisologo I. Polarimetric rainfall retrieval from a C-Band weather radar in a tropical environment (The Philippines) // *Asia-Pacific J. of the Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 50, iss. 1, pp. 595–607.
8. Bringi V. N., Chandrasekar V. *Polarimetric doppler weather radar: principles and applications*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2001, XXV, 636 p.

9. Cirulnikov M. D., Svireno P. I., Gorin V. E. [et al.] *Novai technologiya obiektnogo analiza na osnove shemy 3D-VAR* [New objective analysis technology based on 3D-VAR scheme]. Obninsk, 2012, no. 39, pp. 7–14. (in Russian)
10. Wang H., Huang X.-Y., Sun J. [et al.] Inhomogeneous background error modeling for WRF-var using the NMC method. *J. of Appl. Meteorology a. Climatology*, 2014, vol. 53, iss. 10, pp. 2287–2309.
11. *Ohrana okrugauschei sredy. Hydrometeorologia. Pravila sostavleniya* [Environmental protection and natural resource management. Hydrometeorology. Rules for compiling short-term weather forecasts for general purposes: TKP 17.10-06-2008 (02120): approved. M-vom nature. resources and environmental protection. environment Rep. Belarus 10/31/08: introduced. 01/01/09]. Minsk, 2008, no. IV, 30 p. (in Russian)
12. Davis C. A., Brown B. G., Bullock R., Halley-Gotway J. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program. *Weather a. Forecasting*, 2009, vol. 24, iss. 5, pp. 1252–1267.
13. Lysenko S. A., Zaiko P. O. *Ocenki vliyaniya podstilayushchej poverhnosti na tochnost' chislennogo prognoza temperatury vozduha na territorii Belarusi s ispol'zovaniem modeli WRF* [Estimation of the study of the underlying surface on the accuracy of the calculated forecast of air temperature on the territory of Belarus using the WRF model]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological research and forecasts*, 2021, no. 4 (382), pp. 50–68. (in Russian)
14. Liang S., Zhao X., Liu S. [et al.] A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies. *Intern. J. of Digital Earth.*, 2013, Vol. 6, iss. suppl. 1, pp. 5–33.
15. Lysenko S. A., Zaiko P. O. *Povyschenie tochnosti chislennich prognozov pogody na territorii Belarusi s ispolzovaniem operativnich sputnikovich dannich* [Improving the accuracy of numerical weather forecasts in Belarus using operational satellite data]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 86–98. (in Russian)
16. Buchhorn M., Bertels L., Smets B. [et al.] Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy": Moderate Dynamic Land Cover 100 m, version 3: algorithm theoretical basis document [S. l. : s. n.], 2020. Available at: <https://zenodo.org/record/4723924#.Y4YJTXbP2Uk> (accessed April 3, 2021).
17. Milbrandt J. A., Yau M. K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II : A proposed three-moment closure and scheme description. *J. of the Atmospheric Sciences*, 2005, vol. 62, iss. 9, pp. 3065–3081.
18. Kain J. S., Fritsch J. M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The representation of cumulus convection in numerical models*. Ed. by K. A. Emanuel, D. J. Raymond. Boston, 1993, chap. 16, pp. 165–170.
19. Grell G. A., Dévényi, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Research Letters*, 2002, vol. 29, iss. 14, art. no. 1693.
20. Bagrov A. N., Bykov F. L., Gordin V. A. *Schema operativnogo kratkosrochnogo kompleksnogo prognoza prizemnoi temperatury vozduha i vlagnosti* [Scheme of operational short-term comprehensive forecast of surface air temperature and humidity]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, Moscow, 2018, no. 8, pp. 5–18. (in Russian)
21. Zaiko P. O., Krasouski A. N., Barodka S. K. *Sovershenstvovnie mesomashtabnogo chislennogo prognozirovaniya pogody WRF-ARW v Respublike Belarus putem assimilacii radiolokacionnich dannich o vetre i otrazaemosti* [Improvement of mesoscale numerical weather prediction WRF-ARW in the Republic of Belarus by assimilation of radar wind and reflectivity data]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2020, no. 2, pp. 3–13. (in Russian).

Информация об авторах

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

Зайко Полина Олеговна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: polly_lo@tut.by

Information about the authors

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

Polina O. Zaiko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: polly_lo@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-41-53>
УДК 550.4+504.5(476)

Поступила в редакцию 15.04.2024
Received 15.04.2024

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В МИНСКЕ В 2018–2022 гг.

С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Охарактеризованы особенности химического состава атмосферных осадков на территории г. Минска за период с 2018 по 2022 г. на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси. Основное внимание уделено соединениям серы и азота – основным закисляющим и эвтрофирующим соединениям в атмосферных осадках.

Установлено, что среднегодовые взвешенные содержания серы в атмосферных осадках за исследуемый период варьировали от 0,29 мг S/л (2018 г.) до 0,47 мг S/л (2021 г.), окисленного азота – от 0,21 мг N/л (2019 г.) до 0,43 мг N/л (2020 г.), восстановленного азота – от 0,20 мг N/л (2019 г.) до 0,89 мг N/л (2020 г.).

Выполнено сопоставление данных наблюдений химического состава осадков в г. Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Совместной программы наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе (Программы ЕМЕП); основное внимание уделено станциям, расположенным в странах-соседах Беларуси. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на станциях ЕМЕП характерно для восстановленного азота в 2020 г.

Величины сухих и влажных выпадений серы и азота по данным наблюдений близки расчетным значениям, полученным в рамках Программы ЕМЕП. Установлено, что модельные величины годовых влажных выпадений в целом близки расчетным по данным мониторинга на экспериментальной площадке. Максимальные уровни выпадений как серы, так и азота, согласно моделированию по Программе ЕМЕП, характерны для 2020 г.; для этого же года характерны пиковые уровни выпадений и по данным измерений на экспериментальной площадке.

Выявлена сходимость рядов годового средневзвешенного содержания серы в осадках в г. Минске и на станциях фонового мониторинга Европейской территории России (ЕТР).

Ключевые слова: атмосферные осадки; атмосферные выпадения; азот; сера; закисление; эвтрофирование.

Для цитирования. Какарека С. В., Кокош Ю. Г., Кудревич М. А. Особенности химического состава атмосферных осадков в Минске в 2018–2022 гг. // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 41–53.

FEATURES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN MINSK IN 2018–2022

S. V. Kakareka, Yu. G. Kokosh, M. A. Kudrevich

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

Abstract. The features of the chemical composition of atmospheric precipitation on the territory of Minsk for the period from 2018 to 2022 are characterized based on an analysis of the results of monitoring the chemical composition of atmospheric precipitation at the experimental site of the Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus. The main attention is paid to sulfur and nitrogen compounds – the major acidifying and eutrophication compounds in atmospheric precipitation.

It was established that the average annual suspended sulfur content in precipitation during the study period varied from 0.29 mg S/l (2018) to 0.47 mg S/l (2021), oxidized nitrogen – from 0.21 mg N/l (2019) to 0.43 mg N/l (2020), reduced nitrogen – from 0.20 mg N/l (2019) to 0.89 mg N/l (2020).

A comparison was made of observation data on the chemical composition of precipitation in Minsk with the dynamics of sulfur and nitrogen content in precipitation at Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe (EMEP Program) stations; the main attention is paid to stations located in neighboring countries

to Belarus. The most noticeable deviation of the average annual content in atmospheric precipitation in Minsk from the range of concentration fluctuations during the period under review at EMEP stations is typical for refurbished nitrogen in 2020.

The comparison was made of the values of atmospheric deposition of sulfur and nitrogen based on observation data on the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk with the calculated values of dry and wet deposition of sulfur and nitrogen obtained within the framework of the EMEP Program. It has been established that the model values of annual wet deposition are generally close to those calculated from monitoring data at the experimental site. The maximum levels of the deposition of both sulfur and nitrogen, according to modeling by the EMEP Program, are typical for 2020; for the same year is characterized by peak levels of fallout and according to measurements at the experimental site.

The convergence of series of annual weighted average sulfur content in precipitation in Minsk and at background monitoring stations in the European territory of Russian Federation (ETR) was revealed.

Keywords: precipitation; atmospheric deposition; nitrogen; sulfur; acidification; eutrophication.

For citation. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. Features of the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk in 2018–2022. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 41–53.

Введение. Химический состав осадков является интегральной характеристикой загрязнения приземного слоя атмосферы. Осадки представляют собой значительную часть всех атмосферных выпадений, оказывая влияние на состояние почв, экосистем и поверхностных вод, что, в свою очередь, влияет на здоровье человека. Изучение химического состава атмосферных осадков позволяет получить важные данные о составе атмосферы, выявить источники и пути распространения загрязняющих веществ. Таким образом, атмосферные осадки являются важным индикатором качества атмосферного воздуха и могут быть использованы для мониторинга загрязнения окружающей среды.

Исследования химического состава атмосферных осадков привели к выявлению неоднородности выпадения химических элементов в пространстве и времени. Факторы, влияющие на уровни осадков, включают тип, интенсивность и распределение природных источников химических веществ в атмосферу, природные условия, атмосферную циркуляцию, процессы переноса и удаления химических веществ из атмосферы, а также интенсивность промышленной, сельскохозяйственной и транспортной деятельности.

Данные литературных источников свидетельствуют о разнообразии химических элементов, присутствующих в атмосферных осадках, выпадающих в различных местах [1–5]. Исследования показали, что анализ химического состава дождевой воды в определенном месте или регионе позволяет оценить локальное и региональное распространение загрязняющих веществ с атмосферными потоками [6].

Интенсивные исследования атмосферных осадков проводятся во всем мире в течение последних 30 лет в рамках многих национальных и международных программ, в частности, Совместной программы наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе (Программы ЕМЕП [3, 4, 6, 7]). В то же время основная часть наблюдений за осадками проводится на фоновых территориях, в связи с чем вопросы изменений химического состава осадков в городах остаются недостаточно изученными.

С 1999 г. Институтом природопользования НАН Беларуси организована площадка наблюдения за химическим составом атмосферных осадков и снежного покрова в г. Минске. Постоянные исследования на площадке стали проводить, начиная с 2002 г. В ранее опубликованной статье [8] обобщены полученные данные и проанализированы тренды химического состава атмосферных осадков за период с 2002 по 2019 г. Данная статья посвящена анализу особенностей химического состава атмосферных осадков на территории г. Минска за период с 2018 по 2022 г. Основное внимание уделено соединениям серы и азота – основным закисляющим и эвтрофирующим соединениям в атмосферных осадках.

Цели работы – изучить динамику компонентов химического состава атмосферных осадков и снежного покрова во взаимосвязи с метеоусловиями; оценить интенсивность атмосферных выпадений.

Материалы и методы исследований. Экспериментальная площадка расположена в черте г. Минска на территории Института природопользования НАН Беларуси [8]. При формировании программы наблюдений учитывали рекомендации Глобальной службы атмосферы (ГСА) [9] и Программы ЕМЕП [10].

На площадке проводили наблюдения за количеством выпадающих осадков, изучали динамику мощности снежного покрова, контролировали химический состав атмосферных осадков и снеговых вод, метеоусловия. Основным период, за который отбирали пробы осадков в соответствии с рекомендациями Программы ЕМЕП, – неделя. Это позволяет получить существенно более полную информацию о химическом составе осадков, чем при традиционном отборе месячных проб.

Опробование атмосферных осадков проводили при помощи осадкомера конструкции NILU. Для исключения значительного влияния испарения в период накопления пробы в теплое время года использовали летний вариант осадкосборника.

Экспериментальные результаты сопоставляли с результатами измерений на станциях Программы ЕМЕП в Европе, а также на станции комплексного фоновых мониторинга «Березинский заповедник».

При проведении химических испытаний проб осадков использовали действующие технические нормативные правовые акты Республики Беларусь (ТНПА) и методики выполнения измерений (МВИ), прошедшие аттестацию и предназначенные для применения в сфере законодательной метрологии, а также средства измерения и испытательное оборудование, прошедшее поверку и калибровку. Контроль качества выполняемых измерений проводили в соответствии с принятой в лаборатории процедурой внутреннего контроля качества и рекомендаций программ ГСА и ЕМЕП (на основе вычисления ионного баланса) [10], а также путем участия в лабораторных сличительных испытаниях, проводимых Центром обеспечения качества и научной деятельности ГСА.

Содержание сульфатов определяли турбидиметрическим методом (СТБ 17.13.05-42-2015), нитратов и нитритов, ионов аммония – фотометрическим (ГОСТ 33045-2014), величину pH – потенциометрическим методом (СТБ ISO 10523-2009).

В период с 2018 по 2022 г. отобрали 197 проб. Средний объем пробы составил 523,2 мл с диапазоном 10–2910 мл. В пробах атмосферных осадков объемом менее 50 мл были определены только значения кислотности и удельной электропроводности.

Данные результатов химического анализа проб атмосферных осадков и снежного покрова, а также наблюдений за метеоусловиями и состоянием снежного покрова были сформированы в базу данных, созданную в MS Access 2007 и MS Excel 2007.

На основании результатов химико-аналитических испытаний рассчитаны основные статистические параметры по годам, а также среднемесячные и среднегодовые взвешенные концентрации и выпадения за исследуемый период.

Результаты и их обсуждение. За период с 2018 по 2022 г. на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси ежегодно выпадало от 592,6 до 707,5 мм осадков. Наибольшее количество осадков выпадало в летние месяцы и составило 30–46 % суммы годовых осадков. Наименьшее количество осадков за рассматриваемый период, за исключением 2022 г., – в весенние месяцы. В 2022 г. наибольшее количество осадков также выпало в летний период (31 %), наименьшее – в весенний (22 %) и осенний (23 %) периоды года.

В разрезе месячных значений суммы осадков колебались от 1,7 до 170,5 мм со средним значением 52,5 мм. Наименьшие месячные суммы осадков (1,7–19,2 мм) зафиксированы в феврале и апреле 2018 и 2019 г., марте и апреле 2020 г., октябре 2021 г., марте 2022 г. Наибольшее количество осадков (123,6–170,5 мм) выпало в июле 2018 и 2019 г., июне 2020 г., сентябре 2021 г. и июле 2022 г.

Наибольшая вариабельность месячных сумм осадков характерна для 2019 г., когда выпало наименьшее (в апреле – 1,7 мм) и наибольшее (в июле – 144,6 мм) их количество за период.

В зависимости от объема пробы, необходимого для химико-аналитического определения гидрохимического состава, проанализированы 124–178 проб. Статистические характеристики содержания основных ионов, кислотности, электропроводности атмосферных осадков на постоянной площадке в 2018–2022 г. приведены в табл. 1.

Статистические характеристики содержания серы и азота в атмосферных осадках (недельные пробы) на постоянной площадке за исследуемый период по годам приведены в табл. 2.

В 2018 г. содержание серы в осадках варьировало в пределах н. о.–1,40 мг S/л со средним значением 0,37 мг S/л. Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных во второй половине января: 15.01–22.01 (0,78 мг S/л) и 22.01–29.01 (1,12 мг S/л), марте – 05.03–12.03 (0,97 мг S/л) и 26.03–31.03 (1,40 мг S/л) и второй половине апреля и мае: 23.04–30.04 (0,67 мг S/л) и 14.05–21.05 (0,70 мг S/л). Минимальные значения зафиксированы в июле (в пробах, отобранных за периоды 29.06–04.07, 09.07–16.07 и 23.07–30.07), и сентябре (пробы за периоды 10.09–17.09 и 17.09–24.09).

Содержание нитрат-ионов в 2018 г. находилось в диапазоне 0,02–0,91 мг N/л со средним значением 0,34 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 73,3 %. Наибольшие значения получены в пробах за периоды 22.01–29.01 (0,79 мг N/л), 23.04–30.04 (0,91 мг N/л) и 11.06–18.06 (0,76 мг N/л). Наименьшие значения фиксировались в июле (29.06–04.07 и 23.07–30.07), второй половине августа (13.08–20.08 и 20.08–27.08) и сентябре (10.09–17.09 и 24.09–30.09).

Таблица 1. Статистические параметры гидрохимического состава атмосферных осадков на постоянной площадке, 2018–2022 г., мг/л**Table 1. Statistical parameters of the hydrochemical composition of atmospheric precipitation at the permanent site, 2018–2022, mg/l**

Параметр	SO ₄ ²⁻ (S)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ (N)	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ (N)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сумма ионов	pH	Электропроводность, мкСм/см
Среднее	0,54	3,07	0,42	8,57	0,69	1,81	2,67	1,70	0,58	18,63	6,34	43,16
Медиана	0,33	2,14	0,27	4,15	0,42	0,90	0,94	1,06	0,34	11,56	6,28	28,07
Стандартное отклонение	0,70	3,58	0,80	15,16	1,16	3,42	5,75	2,26	0,75	22,78	0,52	45,30
Дисперсия выборки	0,49	12,80	0,64	229,94	1,34	11,71	33,02	5,10	0,56	518,88	0,27	2051,82
Минимум	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0,60	4,33	3,14
Максимум	4,99	24,46	1,75	107,40	12,52	27,00	45,20	11,22	3,89	170,79	7,80	252,00
Количество проанализированных проб	161	150	163	136	158	164	161	124	124	167	175	178
Коэффициент вариации	130,7	116,4	192,3	176,9	169,1	188,8	215,6	132,5	127,8	122,3	8,1	104,9

Примечание: н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Таблица 2. Статистические параметры содержания серы, окисленного и восстановленного азота и pH в пробах атмосферных осадков на постоянной площадке, 2018–2022 г., мг/л**Table 2. Statistical parameters of sulfur content, oxidized and reduced nitrogen and pH in atmospheric precipitation samples at a permanent site, 2018–2022, mg/l**

Показатель	Год	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Дисперсия выборки	Минимум	Максимум	Коэффициент вариации	Количество проб
SO ₄ ²⁻ (S)	2018	0,37	0,33	0,37	0,14	н. о.*	1,40	101,6	28
	2019	0,51	0,36	0,59	0,35	н. о.	2,42	115,4	25
	2020	0,72	0,42	0,89	0,79	н. о.	4,99	123,9	37
	2021	0,65	0,37	0,85	0,73	н. о.	4,41	130,6	34
	2022	0,39	0,25	0,54	0,29	н. о.	2,23	138,8	37
NO ₃ ⁻ (N)	2018	0,34	0,27	0,25	0,06	0,02	0,91	73,3	28
	2019	0,37	0,19	0,40	0,16	н. о.	1,47	109,8	26
	2020	0,67	0,35	1,55	2,39	н. о.	9,73	232,0	38
	2021	0,42	0,30	0,38	0,14	0,05	1,75	91,0	36
	2022	0,24	0,21	0,17	0,03	н. о.	0,62	73,0	35
NH ₄ ⁺ (N)	2018	0,38	0,28	0,40	0,16	н. о.	1,44	104,8	27
	2019	0,38	0,16	0,48	0,23	н. о.	1,60	126,7	25
	2020	1,22	0,83	2,00	4,00	0,07	12,52	164,6	38
	2021	0,89	0,61	0,96	0,91	0,10	5,24	107,0	31
	2022	0,38	0,26	0,37	0,13	н. о.	1,48	95,7	36
pH	2018	6,45	6,51	0,41	0,17	5,42	7,08	6,4	27
	2019	6,20	6,17	0,37	0,14	5,64	6,96	5,9	25
	2020	6,41	6,44	0,64	0,41	4,63	7,80	10,0	43
	2021	6,20	6,21	0,54	0,29	4,33	7,41	8,7	41
	2022	6,44	6,28	0,45	0,20	5,87	7,68	7,0	39

Примечание: н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Среднее содержание ионов аммония в 2018 г. составило 0,38 мг N/л и варьировало в пределах от н. о. до 1,44 мг N/л. Наименьшие значения фиксировались в январе (15.01–22.01, 22.01–29.01), марте (01.03–05.03), июне – июле (18.06–25.06, 29.06–04.07, 09.07–16.07). Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных в марте и середине апреля – мае (05.03–12.03 – 1 мг N/л, 26.03–31.03 – 0,90 мг N/л, 23.04–30.04 – 1,44 мг N/л, 14.05–21.05 – 1,28 мг N/л).

В 2019 г. содержание серы варьировало в пределах н. о.–2,42 мг S/л со средним значением 0,51 мг S/л. Наибольшее значение (2,42 мг S/л) зафиксировано в пробе, отобранной за период 11.11–02.12. Коэффициент вариации значений высокий и составил 115,4 %. Содержание нитрат-ионов в 2019 г. находилось на уровне н. о.–1,47 мг N/л со средним значением 0,37 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 109,8 %. Наибольшие значения – 1,25 и 1,47 мг N/л – получены в пробах, отобранных 04.02–18.02 и 14.10–04.11 соответственно. Среднее содержание ионов аммония составило 0,38 мг N/л и варьировало в пределах от н. о. до 1,60 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 126,7 %. Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных в конце января – феврале (28.01–04.02, 04.02–18.02, 18.02–04.03) – 1,17–1,34 мг N/л и в период 10.05–13.05 (1,60 мг N/л).

В 2020 г. содержание сульфат-иона зафиксировано в 37 из 42 отобранных проб и в среднем составило 0,72 мг S/л. Наибольшие значения получены в недельных пробах, отобранных в апреле – мае 30.04–04.05 (1,97 мг S/л) и 19.05–25.05 (2,22 мг S/л), сентябре (4,99 мг S/л). Наибольшие значения получены при минимальных количествах выпавших осадков (47–60 мл). Наименьшие значения зафиксированы в трех пробах, отобранных в июле. Среднее содержание нитрат-иона в 2020 г. составило 0,67 мг S/л и колебалось в пределах от н. о. до 9,73 мг S/л. Среднее содержание нитрат-ионов составило 0,67 мг N/л и варьировало в широких пределах – от н. о. до 9,73 мг N/л. Наибольшее значение зафиксировано в пробе, отобранной 03.02–10.02. Остальные значения в течение года не превышали 1,52 мг N/л. Содержание ионов аммония находилось в диапазоне 0,07–12,52 мг N/л и в среднем составило 1,22 мг N/л. Наибольшее значение (12,52 мг N/л) зафиксировано в пробе, отобранной за период 05.10–12.10.

В 2021 г. содержание серы определено в 34 пробах и варьировало в пределах н. о.–4,41 мг S/л со средним значением 0,65 мг S/л. Коэффициент вариации значений высокий и составил 130,6 %. Содержание нитрат-ионов находилось на уровне 0,05–1,75 мг N/л со средним значением 0,42 мг N/л; коэффициент вариации значений высокий и составил 91,0 %. Среднее содержание ионов аммония составило 0,89 мг N/л (диапазон 0,10–5,24 мг N/л).

В 2022 г. содержание серы варьировало в пределах н. о.–2,27 мг S/л со средним значением 0,39 мг S/л. Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных в конце марта – начале апреля: 28.03–04.04 (2,27 мг S/л), мае: 09.05–16.05 (1,97 мг S/л) и конце октября: 24.10–31.10 (1,42 мг S/л). Минимальные значения зафиксированы в январе – феврале (в пробах, отобранных за периоды 03.01–10.01, 10.01–17.01, 07.02–14.02, 14.02–21.02), мае (16.05–23.05, 23.05–30.05), июле (в пробах, отобранных за периоды 06.07–12.07, 25.07–01.08) и сентябре – начале октября (недельные пробы за периоды 05.09–10.10 и 17.10–24.10).

Содержание нитрат-ионов в 2022 г. находилось в диапазоне н. о.–0,62 мг N/л со средним значением 0,24 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 53,1 %. Среднее содержание ионов аммония в 2022 г. составило 0,38 мг N/л и варьировало в пределах от н. о. до 1,48 мг N/л.

За период с 2018 по 2022 г. минерализация проб атмосферных осадков, отобранных на постоянной площадке, в 85 % проб не превышала 30 мг/л, при этом около 63 % проб имели значение минерализации менее 15 мг/л. Средняя минерализация атмосферных осадков за период наблюдений с 2018 по 2022 г. составила 18,6 мг/дм³ и варьировало от 0,6 до 170,7 мг/л. Коэффициент вариации – 122,3 %. Минимальное среднее годовое значение минерализации проанализированных проб (4,12 мг/дм³) зафиксировано в 2018 г., максимальное – (32,6 мг/дм³) в 2020 г. (см. табл. 1).

Значения удельной электропроводности варьировали в пределах 3,14–252 мкСм/см со средним значением 43,16 мкСм/см. Разброс значений составил 104,9 %. Минимальные показатели электропроводности чаще характерны для периодов выпадения наибольших количеств осадков за неделю.

В 2018–2022 гг. значение pH недельных проб атмосферных осадков изменялось в диапазоне 4,33–7,80 со средним значением 6,34; коэффициенты вариации значений были довольно низкие (5,9–10,0 %), что свидетельствует о достаточно однородном внутригодовом распределении содержания данного компонента. Среднегодовые значения pH изменялись незначительно (от 6,20 до 6,45) и превышали равновесную величину для атмосферных осадков (5,6).

Среднее содержание соединений серы за период составило 0,54 мг S/л, окисленного азота – 0,42 мг N/л, восстановленного азота – 0,69 мг N/л.

Для большинства ионов характерна высокая вариабельность значений (коэффициент вариации – 116,4–215,6 %). Наибольшей вариабельностью характеризуются окисленный азот (192,3 %), гидрокарбонаты (176,9 %), натрий (188,8 %) и калий (215,6 %); меньшие отклонения от среднего характерны для хлоридов (116,4 %), сульфатов (130,7 %), кальция (132,5 %) и магния (127,8 %) (см. табл. 1).

В динамике среднегодового взвешенного содержания фиксируются повышенные значения для всех трех закисляющих и эвтрофирующих соединений в 2020 г., а для серы – еще и в 2021 г. Эта закономерность сохраняется при пересчете месячных концентраций на средневзвешенные значения, а также при расчете выпадений.

Большинство зафиксированных максимальных и минимальных значений среднемесячного взвешенного содержания серы и азота в осадках совпадают по времени. Однако имеются и отличия: например, в марте 2022 г., когда зафиксировано наибольшее среднемесячное содержание серы, содержание окисленного и восстановленного азота фиксировалось на уровне ниже предела обнаружения метода.

В 2018 г. наибольшие значения концентраций всех трех рассматриваемых ионов наблюдались в марте – мае, в 2019 г. – в конце февраля – начале марта, в июне и в конце года (ноябре – декабре), в 2020 г. – в феврале – марте, июне и октябре, в 2021 г. – в марте – апреле и октябре – декабре, в 2022 г. – в апреле и октябре – декабре (рис. 1).

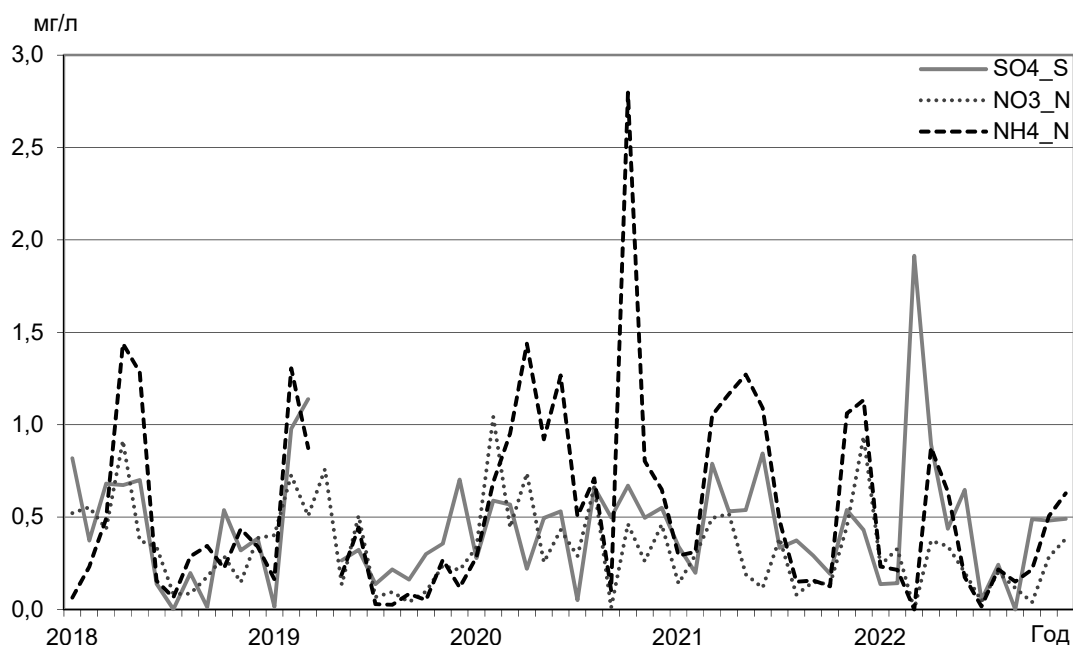


Рис. 1. Динамика среднемесячного взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске, 2018–2022 гг.

Fig. 1. Dynamics of the monthly weighted average sulfur and nitrogen content in precipitation in Minsk, 2018–2022

Минимальные среднемесячные взвешенные концентрации всех трех компонентов в 2018 г. зафиксированы в июле, в 2019 и 2022 г. – в июле и сентябре. В 2020 г. минимальные значения окисленного и восстановленного азота приходились на сентябрь, серы – на июль. В 2021 г. минимальные значения окисленного и восстановленного азота зафиксированы в августе – октябре, серы – в октябре.

В 2018 г. наибольшие значения среднемесячного взвешенного содержания серы приходились на январь и май, в 2019 г. – на февраль и март, в 2020 г. фиксировались в августе и октябре, в 2021 г. – в марте и июне, в 2022 г. приходились на март – апрель и октябрь – декабрь.

Наибольшие значения среднемесячного взвешенного содержания окисленного азота в 2018, 2019 и 2020 г. фиксировались в феврале и апреле, в 2021 г. – в марте – апреле и ноябре – декабре, в 2022 г. – в апреле – мае и ноябре – декабре.

Наибольшие значения среднемесячного взвешенного содержания окисленного азота в 2018 г. зафиксированы в апреле – мае, в 2019 г. – в феврале, в 2020 г. – апреле, июне и октябре, в 2021 г. – в марте, апреле, мае, июне и ноябре – декабре, в 2022 г. в апреле – мае и ноябре – декабре.

Ряды месячных выпадений серы и азота в целом близки рядам средних месячных взвешенных концентраций (рис. 2). Однако некоторые пиковые значения концентраций не сопровождаются пиковыми значениями выпадений и наоборот.

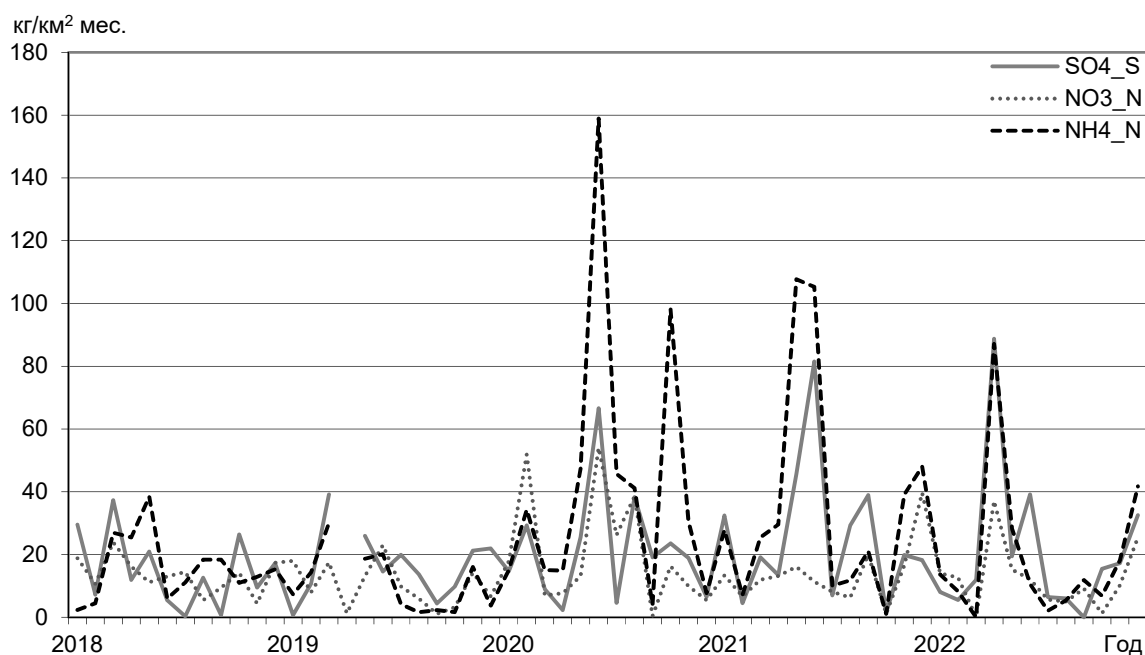


Рис. 2. Динамика месячного выпадения серы и азота с атмосферными осадками в г. Минске, 2018–2022 гг.

Fig. 2. Dynamics of monthly deposition of sulfur and nitrogen with precipitation in Minsk, 2018–2022

Среднегодовые взвешенные содержания серы в атмосферных осадках за исследуемый период варьировали от 0,29 мг S/л (2018 г.) до 0,47 мг S/л (2021 г.), окисленного азота – от 0,21 мг N/л (2019 г.) до 0,43 мг N/л (2020 г.), восстановленного азота – от 0,20 мг N/л (2019 г.) до 0,89 мг N/л (2020 г.) (табл. 3). Годовые выпадения серы были максимальными также в 2021 г., окисленного и восстановленного азота – в 2020 г.

Таблица 3. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках годового выпадения серы и азота в г. Минске, 2018–2022 г., мг/л

Table 3. Dynamics of the annual weighted average sulfur and nitrogen content in precipitation and annual deposition of sulfur and nitrogen in Minsk, 2018–2022, mg/l

Год	Содержание в осадках			Годовые выпадения, кг/км ²		
	SO ₄ ²⁻ , мг S/л	NO ₃ ⁻ , мг N/л	NH ₄ ⁺ , мг N/л	Серa	Азот	
					окисленный	восстановленный
2018	0,29	0,26	0,31	178,9	158,9	190,5
2019	0,31	0,21	0,20	182,1	121,7	119,8
2020	0,45	0,43	0,89	258,2	248,2	512,8
2021	0,47	0,25	0,65	311,5	164,2	433,9
2022	0,37	0,22	0,35	250,4	147,6	233,9

Сравнение с данными наблюдений на сети станций ЕМЕП. Выполнено сопоставление данных наблюдения химического состава осадков в г. Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Программы ЕМЕП; основное внимание уделено станциям, расположенным в странах – соседях Беларуси: Латвии – станция «Рукава» (LV0010R), Литве – станция «Прейла» (LT0015R) и Польше – станция «Дьябла Гора» (PL0005R). Использованы данные электронной базы данных EBAS [11, 12].

В 2018 г. среднегодовое содержание серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске в целом близко содержанию в осадках на близлежащих станциях ЕМЕП (станции «Рукава» и «Прейла»), несколько ниже среднего по станциям ЕМЕП.

В 2019 г. среднегодовое содержание серы и азота было ниже, чем на станции «Рукава», но выше, чем на станции «Прейла», и близко средним значениям по станциям ЕМЕП в Европе.

В 2020 г. замеренное среднегодовое содержание серы и окисленного азота в г. Минске было близко значениям на станции «Рукава», существенно выше, чем на станции «Прейла» и среднего значения по Европе. Среднее содержание аммонийного азота существенно выше – самое высокое за период с 2003 г., нитратного азота – за период с 2007 г. Велико и медианное значение концентраций аммонийного азота. Вероятно влияние локальных источников и сухого осаждения, так как аммиак имеет наименьшую дальность переноса.

В 2021 г. ситуация являлась разнородной: содержание серы в осадках было существенно выше среднего по Европе, а также значений, зафиксированных на станциях «Рукава» и «Прейла», окисленного азота – близко значениям, замеренным на станции «Прейла» и выше среднего значения по Европе и на станции «Рукава», восстановленного азота – существенно выше, чем на ближайших станциях и среднего значения по Европе. Медианное содержание восстановленного азота тоже высокое. Таким образом, на величину среднего влияют не только пиковые значения.

В 2022 г. среднегодовые концентрации серы и азота в г. Минске не выходили за пределы диапазона среднегодовых концентраций, замеренных на станциях «Рукава» и «Дьябла Гора».

Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках по данным измерений на экспериментальной площадке и на станциях «Рукава» и «Дьябла Гора» за период с 2018 по 2022 г. показана на рис. 3. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на указанных станциях ЕМЕП характерно для восстановленного азота.

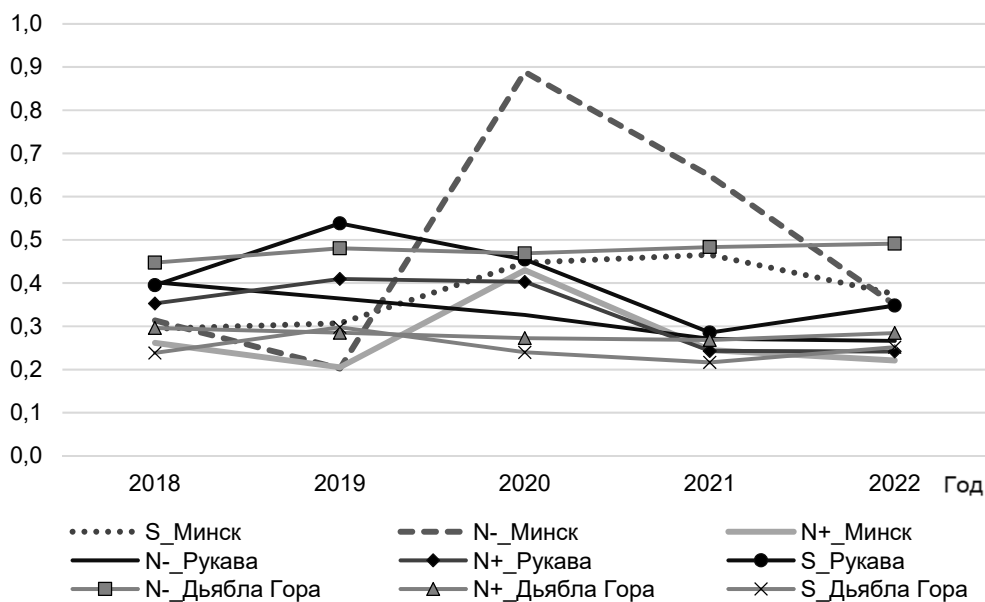


Рис. 3. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске и на станциях ЕМЕП «Рукава» и «Дьябла Гора», 2018–2022 гг.

Fig. 3. Dynamics of the annual weighted average sulfur and nitrogen content in precipitation in Minsk and at the EMEP stations "Rukava" and "Diabla Gora", 2018–2022

Сравнение величин выпадений по данным измерений на экспериментальной площадке с расчетными значениями выпадений, полученными по Программе ЕМЕП. Выполнено сравнение величин атмосферных выпадений серы и азота по данным наблюдения за химическим составом атмосферных осадков в г. Минске с расчетными величинами сухих и влажных выпадений серы и азота, полученными в рамках Программы ЕМЕП [13]. Использованы результаты моделирования выпадений по сетке ЕМЕП $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Динамика месячного валового выпадения серы и азота в г. Минске по данным модельных расчетов показана на рис. 4, динамика годового валового выпадения – в табл. 4.

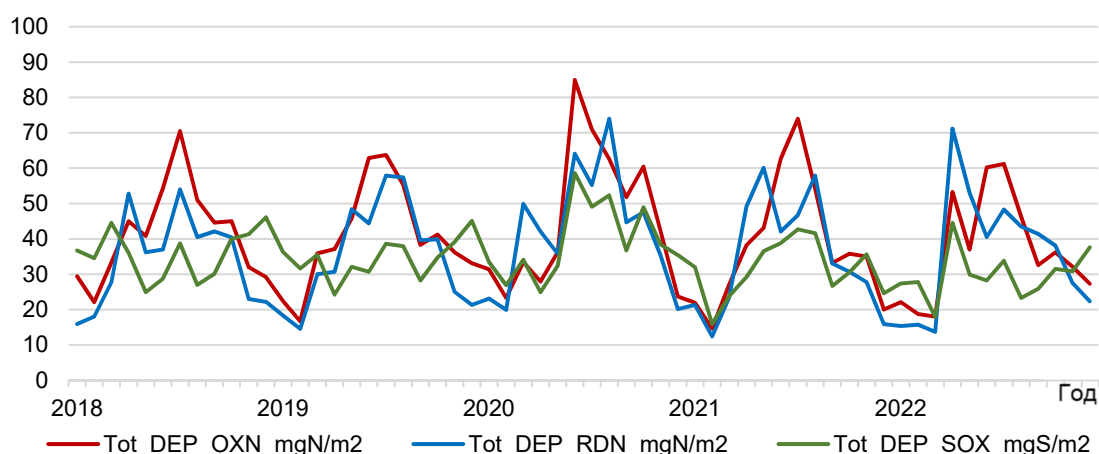


Рис. 4. Динамика месячного выпадения серы (mg S/m^2) и азота (mg N/m^2) в г. Минске по данным модельных расчетов ЕМЕП, 2018–2022 гг. [13]

Fig. 4. Dynamics of monthly deposition of sulfur (mg S/m^2) and nitrogen (mg N/m^2) in Minsk according to EMEP model calculations, 2018–2022 [13]

Таблица 4. Динамика годового выпадения серы и азота в г. Минске по данным модельных расчетов ЕМЕП, 2018–2022 гг. [13]

Table 4. Dynamics of annual deposition of sulfur and nitrogen in Minsk according to EMEP model calculations, 2018–2022 [13]

Год	Сера, кг S /км ²			Окисленный азот, кг N/км ²			Восстановленный азот, кг N/км ²		
	Выпадения								
	влажные	сухие	валовые	влажные	сухие	валовые	влажные	сухие	валовые
2018	188,3	240,2	428,5	195,8	301,4	497,2	281,1	128,7	409,8
2019	168,2	245,8	414,0	178,7	309,9	488,6	290,8	136,6	427,4
2020	221,1	250,0	471,1	237,4	311,5	548,9	371,3	140,4	511,7
2021	152,3	225,6	377,9	177,0	282,8	459,8	291,6	129,0	420,6
2022	154,4	204,2	358,6	183,8	261,2	445,0	301,6	128,9	430,5

Модельные месячные величины выпадений имеют выраженные пики в летний период.

Модельные величины годовых влажных выпадений в целом близки расчетным по данным мониторинга на экспериментальной площадке (см. табл. 4). Максимальные уровни выпадений как серы, так и азота, согласно моделированию по Программе ЕМЕП, характерны для 2020 г.; для этого же года характерны пиковые уровни выпадений и по данным измерений на экспериментальной площадке.

Для 2020 г. характерна также максимальная доля влажных выпадений в суммарных (46 % для серы, 44 % для окисленного азота и 70 % для восстановленного азота).

Сравнение полученных результатов с результатами мониторинга серы и азота в атмосферных осадках на Европейской части Российской Федерации (ЕТР – Европейская территория России). Выполнено сопоставление данных наблюдения средневзвешенных концентраций серы и азота в г. Минске с данными об их содержании в осадках двух ближайших физико-географических регионов России [14, 15].

Выявлено, что среднее взвешенное годовое содержание серы в атмосферных осадках в регионах России в 2018–2022 гг. существенно выше, чем в г. Минске: в Центральной ЕТР годовые концентрации серы составили 3,2–4,4 мг/л, в Северной и Северо-западной ЕТР – 1,52–2,0, в г. Минске – 0,9–1,41 мг/л; наиболее схожие значения концентраций получены в 2020 г. (табл. 5).

Таблица 5. Значения среднегодовые взвешенных концентраций серы и азота в осадках на территории Европейской части Российской Федерации (ЕТР), 2018–2022 гг., мг/л [14, 15]

Table 5. Average annual weighted sulfur and nitrogen concentrations in precipitation on the territory of the European part of the Russian Federation (ЕТР), 2018–2022, mg/l [14, 15]

Показатель	Регион	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
SO ₄	Север и Северо-запад ЕТР	2,0	1,8	1,6	1,67	1,52
	Центр ЕТР	3,3	4,4	3,2	3,61	3,27
	г. Минск (данное исследование)	0,9	0,9	1,4	1,41	1,11
NO ₃	Север и Северо-запад ЕТР	1,3	1,1	1,2	1,20	1,34
	Центр ЕТР	2,1	2,4	2,3	2,66	2,05
	г. Минск (данное исследование)	1,2	0,9	1,9	1,11	0,97
NH ₄	Север и Северо-запад ЕТР	0,4	0,3	0,3	0,31	0,38
	Центр ЕТР	0,6	0,7	0,7	0,58	0,59
	г. Минск (данное исследование)	0,4	0,26	1,1	0,84	0,45

Среднегодовые взвешенные содержания нитратного азота в атмосферных осадках за исследуемый период варьировали от 1,2 мг/л (2020 и 2021 г.) до 1,34 мг/л (2021 г.) для Севера и Северо-запада ЕТР и от 2,05 мг/л (2022 г.) до 2,66 мг/л (2021 г.) для Центра ЕТР.

Годовые взвешенные концентрации аммонийного азота в Северной и Северо-западной ЕТР варьировали от 0,3 мг/л (2019 и 2020 г.) до 0,4 мг/л (2018 г.), в Центральной ЕТР – от 0,58 мг/л (2021 г.) до 0,7 мг/л (2019 и 2020 г.). Наиболее близкие годовые средневзвешенные концентрации аммонийного и нитратного азота в регионах России и в г. Минске – в 2018 и 2019 г.

Сравнение с данными станций фоновое мониторинга ЕТР. Проведенный анализ показал сходимость рядов среднегодового взвешенного содержания серы в осадках в г. Минске и на станциях фоновое мониторинга ЕТР [16]. В г. Минске и на станции Воронежского биосферного заповедника (БЗ) отмечается близкое годовое средневзвешенное содержание серы за весь анализируемый период, за исключением 2021 г., в г. Минске и на станциях Приокско-Террасного БЗ и Кавказского БЗ – за анализируемый период, за исключением 2020 г. (рис. 5, а).

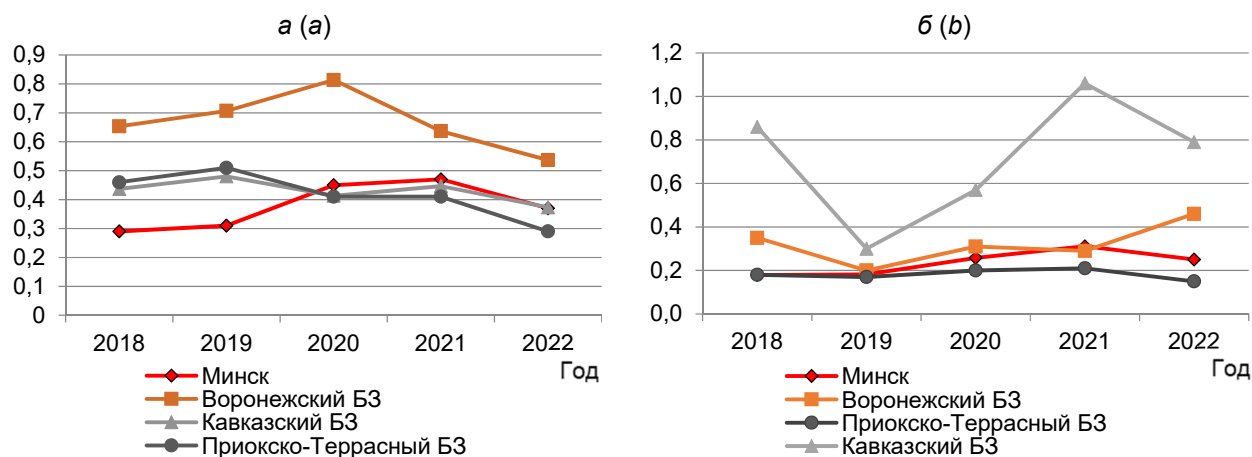


Рис. 5. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы (мг S/л) (а) и годовых выпадений серы (т S/км²) (б) в г. Минске и на станциях фоновое мониторинга Европейской территории России (ЕТР)

Fig. 5. Dynamics of average annual weighted sulfur concentrations (mg S/l) (a) and annual sulfur deposition (t S/km²) (b) in Minsk and at background monitoring stations of the European territory of the Russian Federation (ЕТР)

Ряд выпадения серы в Минске имеет наибольшую сходимость с рядом годовых выпадений серы в Приокско-Тerrasном БЗ (рис. 5, б).

Анализ динамики годового средневзвешенного содержания окисленного и восстановленного азота в г. Минске и на станциях фонового мониторинга ЕТР не выявил сходства. Сходимость рядов годовых взвешенных концентраций окисленного азота в г. Минске и Приокско-Тerrasном БЗ получена в 2018–2019 и 2021–2022 гг., в г. Минске и Воронежском БЗ, Кавказском БЗ – в 2021–2022 гг. Сходимость рядов годовых взвешенных концентраций восстановленного азота в г. Минске и Воронежском БЗ зафиксирована в 2018–2019 гг., в г. Минске и Приокско-Тerrasном БЗ – в 2021–2022 гг.

Анализ динамики годовых выпадений окисленного и восстановленного азота в г. Минске и на станциях фонового мониторинга ЕТР также не выявил сходства. В отдельные годы получена сходимость рядов годовых взвешенных концентраций окисленного и восстановленного азота в г. Минске и Воронежском БЗ, Кавказском БЗ (2018–2019 гг.), а также в г. Минске, Приокско-Тerrasном БЗ и Кавказском БЗ (2021–2022 гг.).

Сравнение с данными НСМОС. В Республике Беларусь по данным на 2022 г. наблюдения за химическим составом атмосферных осадков проводились на 22 пунктах наблюдений Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) [17]. В г. Минске в 2018–2022 гг. общая минерализация проб атмосферных осадков составила 9,5–12,0 мг/л, из которых на долю сульфатов приходилось 6–10 %. В соответствии с имеющимися данными, в период с 2020 по 2022 г. наблюдалась сходимость рядов среднегодового содержания серы в атмосферных осадках на станции НСМОС в г. Минске и в рамках нашего исследования. Кроме того, отмечается схожая тенденция к сокращению среднегодовых концентраций серы в указанный период.

Заключение. Выполненное исследование позволило охарактеризовать особенности химического состава атмосферных осадков на территории г. Минска за период с 2018 по 2022 г. на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси.

Сопоставление данных наблюдений химического состава осадков в г. Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Программы ЕМЕП показало, что в целом диапазон средних месячных и годовых концентраций серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске укладывается в диапазон изменений концентраций этих компонентов на станциях ЕМЕП. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на указанных станциях ЕМЕП характерно для восстановленного азота в 2020 г.

Сравнение величин атмосферных выпадений серы и азота по данным наблюдения за химическим составом атмосферных осадков в г. Минске с расчетными величинами сухих и влажных выпадений серы и азота, полученными в рамках Программы ЕМЕП, показало, что модельные величины годовых влажных выпадений в целом близки расчетным по данным мониторинга на экспериментальной площадке. Максимальные уровни выпадений как серы, так и азота, согласно моделированию по Программе ЕМЕП, характерны для 2020 г.; для этого же года свойственны пиковые уровни выпадений и по данным измерений на экспериментальной площадке.

Выявлена сходимость рядов годового средневзвешенного содержания серы в осадках в г. Минске и на станциях фонового мониторинга ЕТР.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания подпрограммы 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование» государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы (№ госрегистрации 20210126).

Acknowledgements. The study has been performed within the Task of the Subprogram 1 "Natural resources and their rational use" of the State Program of Scientific Investigations "Natural Resources and Environment" for 2021–2025 (State registration no. 20210126).

Список использованных источников

- Mehr, M. R. Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site / M. R. Mehr, B. Keshvarsari, A. Sorooshian // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 668. – P. 1213–1221.
- Chemical Composition Characteristics and Source Contributions of Precipitation in Typical Cities on the North Slope of Tianshan Mountain in Xinjiang during 2010–2019 / Y. Zhong [et al.] // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13 (5). – P. 646. doi:10.3390/atmos13050646
- A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus / R. Vet [et al.] // *Atmos. Environ.* – 2014. – Vol. 93. – P. 3–100. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.060
- Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017 / A. Keresztesi [et al.] // *Environmental Sciences Europe*. – 2019. – Vol. 31 (1). – Art. 50. doi:10.1186/s12302-019-0234-9
- Еремина, И. Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений / И. Д. Еремина // *Вестник Московского ун-та. Сер. 5, География*. – 2019. – № 3. – С. 3–10.
- Mouli, P. C Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition / P. C. Mouli, S. V. Mohan, S. J. Reddy // *Atmos Environ.* – 2005. – Vol. 39. – P. 999–1008. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.10.036
- Fagerli, H. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980–2003 / H. Fagerli, W. Aas // *Environmental Pollution*. – 2008. – Vol. 154 (3). – P. 448–461.
- Какарека, С. В. Тренды содержания закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках на урбанизированной территории / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Доклады НАН Беларуси*. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 724–733. doi:10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733
- Manual for the GAW precipitation chemistry programme [Электронный ресурс] // QA/SAC - Americas. – Режим доступа: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf. – Дата доступа: 24.06.2021.
- EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis. 2001. EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Lillestrom, Norway.
- EMEP/CCC Reports 2020–2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html>. – Дата доступа: 04.02.2024.
- EBAS Home, 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ebas.nilu.no/>. – Дата доступа: 12.03.2024
- EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html. – Дата доступа: 18.03.2024.
- Ежегодник Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018–2022 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo>. – Дата доступа: 24.01.2024.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2018–2022 гг. [Электронный ресурс] / под ред. проф. Г. М. Черногаевой ; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – Режим доступа: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>. – Дата доступа: 24.01.2024.
- Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2018–2022 гг. [Электронный ресурс] / под ред. проф. Г. М. Черногаевой. – Режим доступа: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>. – Дата доступа: 24.01.2024.
- Национальная система мониторинга окружающей среды [Электронный ресурс] // Мониторинг атмосферного воздуха. Результаты наблюдений за 2018–2022 гг. – Режим доступа: <https://www.nsmos.by/publikacii>. – Дата доступа: 24.01.2024.

References

- Mehr M. R., Keshvarsari B., Sorooshian A. Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site. *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 668, pp. 1213–1221.
- Zhong Y., Li X., Fan Z., Ayitken M., Li S., Liu X. Chemical Composition Characteristics and Source Contributions of Precipitation in Typical Cities on the North Slope of Tianshan Mountain in Xinjiang during 2010–2019. *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (5), p. 646. doi:10.3390/atmos13050646
- Vet R., Artz R. S., Carou S., Shaw M., Ro Ch.-Un, Aas W., Baker A., Van C. Bowersox, Dentener F., Galy-Lacaux C., Hou A., Pienaar J. J., Gillett R., Forti M. C., Gromov S., Hara H., Khodzher T., Mahowald N. M., Nickovic S., Rao P. S. P., Reid N. W. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 93, pp. 3–100. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.060.

4. Keresztesi Á., Birsan M. V., Nita I. A., Bodor Z., Szép R. Z. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017. *Environ Sci Eur.*, 2019, vol. 31 (1), art. 50. doi:10.1186/s12302-019-0234-9
5. Eremina I. D. *Himicheskij sostav atmosferynyh osadkov v Moskve i tendencii ego mnogoletnih izmenenij* [Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5, Geography*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (in Russian)
6. Mouli P. C., Mohan S. V., Reddy S. J. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmos. Environ.*, 2005, vol. 39, pp. 999–1008. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.10.036
7. Fagerli H., Aas W. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe 1980–2003. *Environ. Pollut.*, 2008, vol. 154, pp. 448–461. doi:10.1016/j.envpol.2008.01.024
8. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Trendy soderzhaniya zakislyayushchih i evtrofiruyushchih soedinenij v atmosferynyh osadkah na urbanizirovan-noj territorii* [Trends in the content of acidifying and eutrophying compounds in atmospheric precipitation in an urbanized area]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 724–733. doi:10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733 (in Russian)
9. Manual for the GAW precipitation chemistry programme. QA/SAC – Americas. Available at: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf (accessed June 24, 2021).
10. EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis. 2001. EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Lillestrom, Norway.
11. EMEP/CCC Reports 2020–2023. Available at: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html> (accessed March 4, 2021).
12. EBAS Home, 2024. Available at: <https://ebas.nilu.no/> (accessed March 12, 2024).
13. EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024. Available at: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (accessed March 18, 2024).
14. *Yezhegodnik Sostoyaniye zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2018–2022 g.* [Annual State of atmospheric pollution in cities on the territory of Russia for 2018–2022]. Available at: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo> (accessed March 20, 2024). (in Russian)
15. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2018–2022 gg.* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2018–2022]. Ed. by Prof. G. M. Chernogayeva. *Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (ROSGIDROMET)* [Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (ROSGIDROMET)]. Available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (accessed March 18, 2024). (in Russian)
16. *Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy na territorii stran SNG za 2018–2022 g.* [Review of the background state of the natural environment in the CIS countries for 2018–2022]. Ed. by Prof. G. M. Chernogayeva. Available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (accessed March 18, 2024). (in Russian)
17. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy* [National system of environmental monitoring]. *Monitoring atmosfernogo vozdukh. Rezul'taty nablyudeniy za 2018–2022 gg.* [National system of environmental monitoring. Monitoring of atmospheric air. Observation results for 2018–2022]. Available at: <https://www.nsmos.by/content/173.html> (accessed January 24, 2024). (in Russian)

Информация об авторах

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

Кокосх Юлия Геннадьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Кудревич Мария Александровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com

Information about the authors

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

Yuliya G. Kokosh – Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Mariya A. Kudrevich – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-54-67>
УДК 556.55 (476.7)

Поступила в редакцию 18.04.2024
Received 18.04.2024

ОЦЕНКА РЕКРЕАЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ВОДОЕМОВ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЮГО-ЗАПАДА БЕЛАРУСИ ПО ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Л. А. Кириченко, А. А. Волчек

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты исследования гидроморфологических показателей городских водоемов, позволившие выявить характерные черты, присущие водоемам урбанизированных территорий юго-запада Беларуси, выполнить их типизацию и оценить рекреационную привлекательность.

На основании характеристик гидроморфологических показателей городских водоемов и их водосборов (происхождение водоема, характер размещения, характер водообмена, форма котловины, тип склона берега, среднегодовое колебание уровня воды, длина полосы естественной прибрежной растительности, характер территории водосбора, максимальная длина, максимальная ширина, площадь водного зеркала, длина береговой линии, максимальная глубина, средняя глубина, показатель удлиненности береговой линии, степень развития береговой линии, литологический состав грунта берега и мелководья, а так же возможность применения в контактных и бесконтактных видах рекреации) оценку рекреационной привлекательности водоемов урбанизированных территорий проводили с помощью разработанных нами индикаторов – уровня рекреационной значимости и уровня антропогенной трансформации. Определено, что практически все водоемы урбанизированных территорий юго-запада Беларуси характеризуются средним или низким уровнем рекреационной значимости. 66,7 % исследованных водоемов характеризуются неблагоприятными значениями показателя безопасности использования водоемов для рекреации, спорта и туризма. Показано, что для городских водоемов присущи различные уровни антропогенной трансформации. Установлено, что водоемы урбанизированных территорий юго-запада Беларуси характеризуются низкой степенью показателя рекреационной привлекательности.

Ключевые слова: городской водоем; индикаторы рекреационной привлекательности; уровень рекреационной значимости; уровень антропогенной трансформации.

Для цитирования. Кириченко Л. А. Волчек А. А. Оценка рекреационной привлекательности водоемов урбанизированных территорий юго-запада Беларуси по гидроморфологическим показателям // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 54–67.

ASSESSMENT OF THE RECREATIONAL ATTRACTIVENESS OF RESERVOIRS ACCORDING TO URBANIZED TERRITORIES OF THE SOUTH-WEST OF BELARUS BASED ON HYDROMORPHOLOGICAL PARAMETERS

L. A. Kirichenko, A. A. Volchak

Brest State Technical University, Brest, Belarus

Abstract. The results of a study of hydromorphological indicators of urban reservoirs are presented in the article. Typification was carried out and characteristic features inherent in the reservoirs of urbanized areas of south-west Belarus were identified. Based on the characteristics of hydromorphological indicators of urban reservoirs and their catchments (the origin of the reservoir, the nature of the location, the nature of water exchange, the type of pits, the type of bank slope, the average annual fluctuation in water level, the length of the strip of natural coastal vegetation, the nature of the catchment area, maximum length, maximum width, square of water mirrors, bankline length, maximum depth, average depth, degree of bankline development, elongation factor, lithological composition of the soil of the coast and shallow water, as well as the possibility of use in contact and non-contact types of recreation the recreational attractiveness of reservoirs in urbanized areas was assessed using the indicators we developed – the level of recreational significance and the level of anthropogenic transformation. It has been determined that almost all reser-

voirs of urbanized areas in the south-west of Belarus are characterized by an average or low level of recreational significance. 66.7% of the studied reservoirs are characterized by an unfavorable indicator of the safety reservoirs used for recreation, sports and tourism. It is shown that urban reservoirs in the southwest of Belarus are characterized by different levels of anthropogenic transformation. It has been established that reservoirs in urbanized areas are characterized by a low indicator of recreational attractiveness.

Keywords: urbanized reservoir; indicators of recreational attractiveness; level of recreational significance; level of anthropogenic transformation.

For citation. Kirichenko L. A., Volchak A. A. Assessment of the recreational attractiveness of reservoirs according to urbanized territories of the south-west of Belarus based on hydromorphological parameters. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 54–67.

Введение. На современном этапе экологических исследований водных объектов наблюдается тенденция комплексного подхода при определении экологического состояния водоема. Согласно нормативных документов экологическое состояние водного объекта Беларуси определяется исходя из характеристик гидроморфологических, гидрохимических и гидробиологических показателей, преобладающими из которых являются гидробиологические показатели. Исследований рекреационной привлекательности водоемов Беларуси, в том числе урбанизированных, проводилось недостаточно [1–3].

Однако, по нашему мнению оценка рекреационной привлекательности водоемов урбанизированных территорий в настоящий момент является необходимой для объективной оценки рекреационного потенциала городских водоемов.

Цель работы – разработать индикаторы рекреационной привлекательности водоемов урбанизированных территорий с учетом характеристик их водосборов и гидроморфологических показателей.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись типичные водоемы урбанизированных территорий юго-запада Беларуси. В качестве типичных водоемов урбанизированных территорий были определены водоемы в зависимости от их местоположения: водоемы парковых зон, водоемы в районе частного сектора, водоемы в районе многоэтажной жилой застройки, водоемы в зоне сильного антропогенного влияния (вблизи автомобильной или железнодорожной магистрали, сельскохозяйственного или промышленного предприятия). Для исследования были отобраны типичные водоемы городов Кобрин, Жабинки, Малориты и Бреста, расположенных на юго-западе Беларуси, имеющих различную численность населения и подверженных влиянию разных видов антропогенной нагрузки: (см. рисунок).

Исследование рекреационной привлекательности урбанизированных водоемов проводили с помощью таких индикаторов как уровень рекреационной значимости и уровень антропогенной трансформации, в основе которых лежат гидроморфологические характеристики водоемов и их водосборов с учетом характера антропогенного воздействия.

Гидроморфологические параметры водоемов и их водосборов определяли полевыми методами и методами ГИС-картирования по следующим морфометрическим характеристикам как происхождение водоема, характер размещения, характер водообмена, форма котловины, тип склона берега, среднегодовое колебание уровня воды, длина полосы естественной прибрежной растительности, характер территории водосбора, максимальная длина (L), максимальная ширина (B), площадь водного зеркала (A), длина береговой линии (L_l), максимальная глубина (H_{max}), средняя глубина (H_{cp}). На основе этих данных рассчитывались показатель удлинённости береговой линии (L^*) и степень развития береговой линии (S) [4–9]:

$$L^* = \frac{L}{B}; \quad (1)$$

$$S = \frac{L_l}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}}. \quad (2)$$

Характеристику потенциала водного объекта с целью отдыха, спорта и туризма определяли по уровню рекреационной привлекательности. Определение уровня рекреационной привлекательности урбанизированного водоема проводили по выделенным нами двум индикаторам – это уровень рекреационной значимости и уровень антропогенной трансформации.

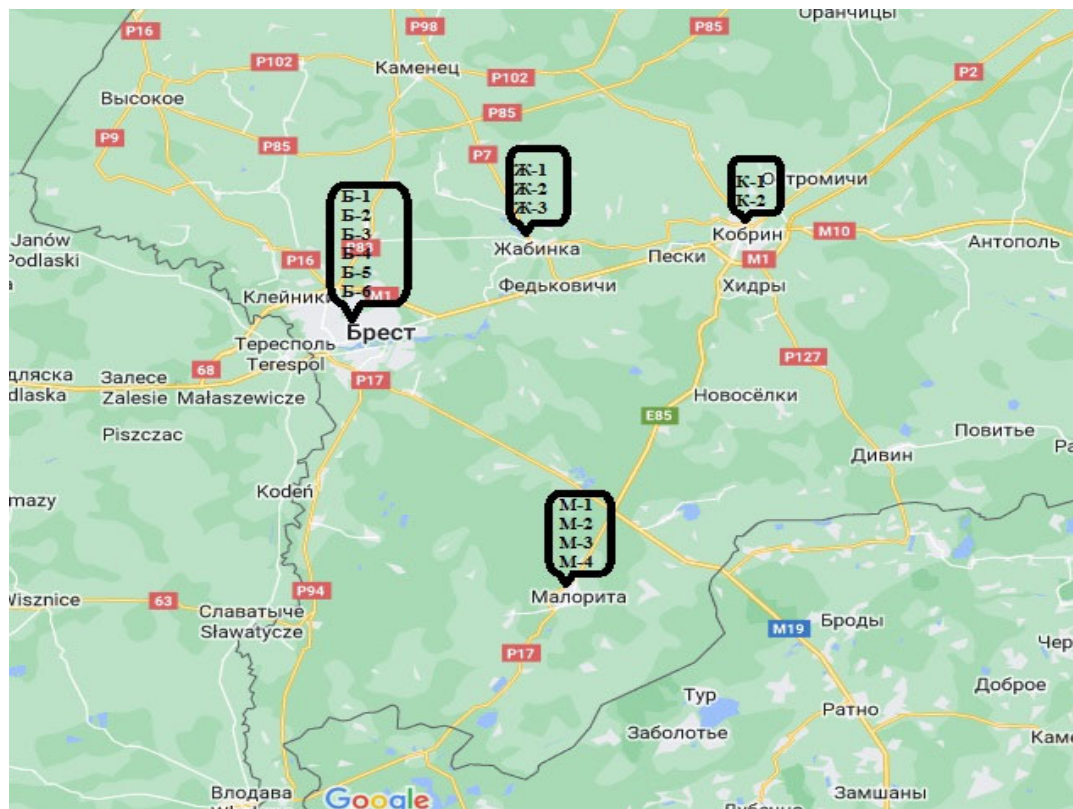


Таблица 1. Основные морфологические характеристики водоемов урбанизированных территорий юго-запада Беларуси и их водосборов**Table 1. The main morphological characteristics of reservoirs in urbanized areas of southwestern Belarus and their catchments**

Водоем	Происхождение	Форма котловины	Характер котловины	Характер водообмена	Тип склона берега	Характер изменения береговой линии	Характер территории водосбора
К-1 Парковый пруд	природно-антропогенное*	вытянутая овальная	озерный	непроточный	берега крутые	укреплена набережной, бетонными блоками со стороны ротонды	расположен в парковой зоне
К-2 Пруд б/н по ул. Полесская	природно-антропогенное*	вогнутая овальная	пруд-копань	непроточный	берега крутые, обрывистые	естественная	расположен в частном секторе
Ж-1 Парковый пруд	природно-антропогенное*	грушевидная, удлиненная	озерный	наливной	берег пологий (С-З), крутой (Ю-В)	набережная со стороны фонтана	расположен в парковой зоне
Ж-2 Пруд «Мухина яма»	природно-антропогенное*	воронковидная, овальная	карьерный	непроточный	берега крутые, обрывистые	естественная	сложный, расположен в малодоступном месте
Ж-3 Пруд «вдхр. Виз-жар»	антропогенное**	трапециевидная	озерный	наливной	берег пологий	укреплена дамбой, бетонные блоки со стороны насосной станции	расположен вблизи частного сектора и с/х предприятия
М-1 Парковый пруд	природно-антропогенное*	трапециевидная	озерный	наливной	берег пологий	набережная	расположен в парковой зоне
М-2 Пруд б/н по ул. Дзержинская	природно-антропогенное*	прямоугольно-лопастная (коронавидная)	карьерный	непроточный	берег пологий (С-З), крутой (Ю-В)	естественная	расположен в частном секторе
М-3 Пруд «Военное озеро»	антропогенное**	овальной	карьерный	наливной	берег пологий	естественная	расположен вблизи частного сектора и с/х предприятия
М-4 Пруд «Торфболото»	антропогенное**	овальной	карьерный	непроточный	Берег пологий	естественная	расположен вблизи частного сектора и с/х угодий
Б-1 Пруд «Вычулки»	природно-антропогенное*	прямоугольная	карьерный	непроточный	берег пологий (С-В), крутой (Ю-З)	естественная	расположен вблизи частного сектора и с/х предприятия
Б-2 Пруд «Зодчих»	природно-антропогенное*	выпуклая прямоугольная	карьерный	непроточный	берег пологий (С-В), крутой (Ю-З)	набережная	расположен вблизи частного сектора и многоэтажных жилых домов
Б-3 Парковый пруд «Нижний»	природно-антропогенное*	яйцевидная	озерный	приточно-наливной	берег крутой, обрывистый	естественная	расположен в парковой зоне
Б-4 Пруд «Гершонский»	антропогенное**	прямоугольная	карьерный	приточно-наливной	берег пологий (С-В), крутой (Ю-З)	естественная	расположен в частном секторе вблизи ж/д полотна
Б-5 Пруд б/н по ул. Кирпичной	антропогенное**	воронковидный, лопастная	карьерный	непроточный	берег крутой, обрывистый	естественная	расположен в частном секторе вблизи автомагистрали Р-17
Б-6 Пруд «Зеркалка»	природно-антропогенное**	овальная	озерный	непроточный	берег пологий (С-В), крутой (Ю-З)	естественная, зона пляжа < 5 %	расположен в частном секторе

*Природно-антропогенные водоемы (ландшафты) – природные водоемы, преобразованные хозяйственной и иной деятельностью человека. Сохраняя естественный характер и подчиняясь природным закономерностям, они несут антропогенное содержание в виде отдельных элементов [10, 11].

**Антропогенные водоемы (ландшафты) – значительно измененные или искусственно созданные человеком на природной основе водоемы [12].

Таблица 2. Гидроморфологические параметры некоторых городских водоемов юго-запада Беларуси**Table 2. Hydromorphological parameters of the some urban reservoirs in the south-west of Belarus**

Водоем	Площадь водного зеркала A , км ²	Средняя глубина, $H_{\text{ср}}$, м	Максимальная глубина, H_{max} , м	Максимальная длина L , км	Максимальная ширина B , км	Длина береговой линии L_1 , км	Степень развития береговой линии, L^*	Коэффициент удлиненности, S	Колебания уровня воды, м	Длина полосы естественной прибрежной растительности, %
К-1	0,020	0,7	1,2	0,200	0,102	1,545	1,96	3,08	0,2–0,4	10
К-2	0,004	0,8	1,5	0,084	0,024	0,290	3,50	1,29	0,2–0,3	70
Ж-1	0,008	1,6	2,2	0,157	0,082	0,400	1,91	1,26	0,1–0,3	80
Ж-2	0,002	1,5	3,2	0,064	0,039	0,250	1,64	1,58	0,1–0,2	95
Ж-3	0,220	1,8	4,1	0,590	0,523	1,820	1,12	1,10	0,2–0,4	75
М-1	0,016	1,5	2,2	0,170	0,123	0,512	1,38	1,14	0,2–0,4	50
М-2	0,007	1,4	2,8	0,144	0,060	0,370	2,40	1,25	0,2–0,3	75
М-3	0,093	0,8	1,7	0,452	0,302	1,180	1,50	1,09	0,4–0,5	60
М-4	0,286	0,6	1,8	0,784	0,493	2,450	1,59	1,29	0,1–0,3	95
Б-1	0,234	2,4	6,5	0,706	0,602	2,120	1,17	2,24	0,2–0,5	90
Б-2	0,012	1,7	2,7	0,156	0,090	0,440	1,73	1,24	0,2–0,3	90
Б-3	0,003	0,7	1,5	0,080	0,053	0,222	1,51	1,14	0,2–0,5	2
Б-4	0,201	5,8	6,7	0,692	0,319	1,860	3,72	1,17	0,2–0,4	92
Б-5	0,060	3,8	5,5	0,535	0,238	1,660	2,25	1,91	0,2–0,4	95
Б-6	0,046	2,4	3,9	0,286	0,201	0,812	1,42	1,07	0,2–0,4	94

Исходя из морфометрических характеристик изученных водоемов юго-запада Беларуси установлено, что большинство урбанизированных водоемов имеют природно-антропогенное происхождение, по характеру размещения котловин делятся на озерные, карьерные и пруды-копани (технологические пруды). Все водоемы характеризуются замедленным водообменом: преобладают непроточные (60,0 %), остальные относятся к приточно-наливному типу. Береговая линия слабоизвилистая, естественная, с различным характером склона: пологий 26,7 %, крутой и обрывистый – 33,3 %, смешанный – 40,0 %.

Изменение береговой линии происходит в основном за счет спрямления берегов и укрепления берегов набережными, дамбами либо железобетонными плитами.

Согласно классификации водоемов по П. В. Иванову [4] по величине их водной поверхности исследованные водоемы урбанизированных территорий юго-запада Беларуси относятся к очень малым (40%; площадь 0,01–0,1 км²) и малым (26,7 %; 0,1–1,0 км²) водоёмам. Кроме того, следует обратить внимание, что не вошедшие в классификацию водоемы с площадью водного зеркала менее 0,01 км² многочисленны и составляют 1/3 от всех изученных урбанизированных водоемов (33,3 %).

Максимальная глубина урбанизированных водоемов незначительна и колеблется от 1,0 до 6,0 м. Установлено, что для урботерриторий юго-запада Беларуси наиболее характерны неглубокие водоемы с «малой глубиной» (до 5 м) [4, 6].

При определении формы котловины водоемов кроме сравнения формы водного зеркала с геометрическими фигурами и стандартных морфометрических параметров применили такие показатели как коэффициент удлиненности котловины L^* и степень развития береговой линии S .

По коэффициенту удлиненности береговой линии L^* , установлены преобладающие формы урбанизированных водоемов юго-запада Беларуси [2, 13]. Таким образом, исходя из коэффициента L^* преобладающие формы урбанизированных водоемов следующие: близкие к овальной форме ($L^* = 3–5$) 2 водоема (12,5 %), близкие к округлой форме ($L^* = 1,5–3,0$) – 9 (60,0 %), округлой формы ($L^* = 1,0–1,5$) – 3 (20,0 %), близкие к квадратной форме – 1 (7,5 % пруд Вычулки, г. Брест).

Степень развития береговой линии S характеризует изрезанность (извилистость) берегов водоема. По степени развития береговой линии выделяют слабоизрезанные, средне- и сильноизрезанные водоемы (минимальное значение характерно для абсолютно круглого водоема $S = 1,0$). В ходе исследования установлено, что для ландшафтов юго-запада Беларуси характерны водоемы с небольшой изрезанностью береговой линии (слабоизрезанные S в пределах 1,1–1,5) – 73,3 %.

Следовательно, для урбанизированных водоемов характерна слабоизрезанная береговая линия и преобладающими являются овальная, округлая и близкие к ним формы котловин. Конфигурация котловин других форм незначительна. Это свидетельствует о природно-антропогенном происхождении водоемов, об изменении и спрямлении береговой линии водного объекта.

Уровень рекреационной значимости водоемов урбанизированных территорий характеризует возможность их использования в целях отдыха, спорта и туризма (см. табл. 4) и определялся нами исходя из характеристик водосбора и использования в рекреационных целях. Согласно Водному кодексу Республики Беларусь от 2014 г. в рекреационных и иных целях может использоваться водный объект, характеризующийся хорошим экологическим состоянием. Поэтому при определении уровня рекреационной значимости основополагающим является экологическое состояние водоемов, которое мы определяли по наихудшему результату исходя из оценки их экологического состояния, по гидрохимическим и гидробиологическим показателям. Оценку экологического состояния водоемов проводили по следующим гидрохимическим показателям: водородному показателю (pH), прозрачности, цветности, минерализации, растворенному кислороду, БПК₅, ХПК, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, железу общему, нефтепродуктам, СПАВ анионноактивным. Отбор проб проводили 4 раза за календарный год – в зимний, весенний, летний и осенний сезоны. Результаты исследований экологического состояния городских водоемов юго-запада Беларуси по гидрохимическим показателям за 2020 г. указаны в публикациях [13–16]. Содержание загрязняющих веществ оценивали по кратности превышения ПДК сравнением исследованных показателей с наименьшим (наиболее жестким) показателем допустимых концентраций химических показателей пригодности воды для рекреационного использования согласно ТКП 17.06-17-2018, СНИП «Требования к содержанию поверхностных водных объектов при их рекреационном использовании», Постановлению Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 05.12.2016, № 122, ПДК загрязняющих веществ для водоемов рыбохозяйственного назначения [7–9]. Санитарно-гигиеническое состояние городских водоемов по данным исследований (общее микробное число – ОМЧ, возбудителей кишечных инфекций бактериальной этиологии – ОКБ) характеризуется неблагоприятными условиями в течение купального сезона (табл. 3). Поэтому экологическое состояние водоемов урбанизированных территорий оценивали с точки зрения водоема как места обитания живых организмов (по гидробиологическим показателям). Оценку экологического состояния водоемов урбанизированных территорий по гидробиологическим показателям проводили с помощью интегрированного трофического индекса TSI и индекса сапробности S (табл. 3). Отбор проб воды для оценки санитарно-гигиенического, трофического и экологического состояния водоемов по гидробиологическим показателям проводили один раз в месяц в период с мая по сентябрь принятыми стандартными методами.

Таблица 3. Экологическое состояние некоторых городских водоемов юго-запада Беларуси в летний период 2020 г.

Table 3. Ecological condition of some urban reservoirs in the southwest of Belarus in the summer of 2020

Водоем	Химические показатели, превышающие ПДК	Экологическое состояние по гидрохимическим показателям	ОМЧ, (не более 100 КОЕ)	ОКБ, (отсутствие)	Индекс трофического состояния, TSI	Трофность	Индекс сапробности, S	Сапробность	Экологическое состояние
К-1	Mg ²⁺ , Fe, БПК ₅ , NO ₃ ⁻	плохое	120	5	58,35	эвтрофное	3,82	полисапробный	плохое
К-2	Fe, БПК ₅ , PO ₄ ³⁻	очень плохое	184	9	72,31	гиперэвтрофное	4,34	гиперсапробный	очень плохой
Ж-1	Fe, NO ₃ ⁻	удовлетворительное	127	3	47,64	мезотрофное	3,09	β-мезосапробный	удовлетворительное
Ж-2	Fe, ХПК	хорошее	100	1	41,23	мезотрофное	2,37	α-мезосапробный	хорошее
Ж-3	Fe, ХПК, СПАВ	плохое	214	12	64,11	эвтрофное	4,44	полисапробный	плохой
М-1	Fe, ХПК, БПК ₅ , NO ₃ ⁻	удовлетворительное	115	3	54,24	эвтрофное	2,78	β-мезосапробный	удовлетворительное
М-2	Fe, ХПК, NO ₃ ⁻	плохое	254	5	64,42	эвтрофное	3,81	полисапробный	удовлетворительное

Водоем	Химические показатели, превышающие ПДК	Экологическое состояние по гидрохимическим показателям	ОМЧ, (не более 100 КОЕ)	ОКБ, (отсутствие)	Индекс трофического состояния, TSI	Трофность	Индекс сапробности, S	Сапробность	Экологическое состояние
М-3	Fe, ХПК, нефтепродукты	плохое	229	4	67,71	эвтрофное	4,58	гиперсапробный	очень плохой
М-4	Fe, ХПК, БПК ₅	удовлетворительное	143	1	54,42	эвтрофное	3,29	полисапробный	удовлетворительное
Б-1	Fe, ХПК, БПК ₅ , СПАВ, PO ₄ ³⁻	очень плохое	287	3	73,14	гиперэвтрофное	4,68	гиперсапробный	очень плохое
Б-2	Ca ²⁺ , Fe, БПК ₅ , Ca ²⁺	плохое	156	2	62,25	эвтрофное	3,72	полисапробный	плохой
Б-3	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe, ХПК, БПК ₅ , PO ₄ ³⁻ , нефтепродукты	очень плохое	294	3	71,12	гиперэвтрофное	4,12	гиперсапробный	очень плохой
Б-4	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe	хорошее	121	2	41,84	мезотрофное	2,88	β-мезосапробный	хороший
Б-5	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe	удовлетворительное	158	2	49,29	мезотрофное	2,45	α-мезосапробный	удовлетворительное
Б-6	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe, ХПК, БПК ₅ , NO ₃ ⁻	плохое	167	3	56,71	эвтрофное	3,62	полисапробный	плохой

В характеристике водосбора определяющим являлось местоположение водоема: в пределах ООПТ, парковой зоны, культурно-исторического объекта, частного сектора, жилого массива, промышленного или сельскохозяйственного предприятия. Рекреационный потенциал оценивали по показателям благоприятного использования в целях отдыха, спорта и туризма по ЭкоНП 17.06.08-003-2022, а так же возможности применения в контактных (купание, водные лыжи, катание на катерах, лодках, катамаранах, гребля на лодках и байдарках, парусный спорт, любительское рыболовство, охота на водоплавающую дичь) и бесконтактных (пляжный отдых, принятие воздушных и солнечных ванн, прогулки вдоль берега) видах рекреации [8, 9].

Исходя из предложенных критериев по уровню рекреационной значимости водоемы урбанизированных территорий разделены нами на четыре группы: высокий, средний, низкий, «нулевой» (табл. 4).

Результаты исследования уровня рекреационной значимости урбанизированных водоемов юго-запада Беларуси показаны в табл. 5, анализ которой показывает, что рекреационная значимость водоема зависит от вида антропогенной нагрузки (степени воздействия человека, его деятельности на водоем – охоты, рыбной ловли, заготовки лекарственных растений, контактных и бесконтактных видов рекреационного воздействия, сброса бытовых и сельскохозяйственных стоков и др. [12]), причем для водоемов урбанизированных территорий исходя из результатов исследований наиболее характерны такие виды антропогенной нагрузки как поверхностный ливневый сток с территории водосбора и рекреационное воздействие.

Большинство исследованных нами городских водоемов характеризуются средним уровнем рекреационной значимости 53,3 % (8 водоемов). Низким уровнем рекреационной значимости характеризуются 40,0 % (6 водоемов) и «нулевым» 6,7 % (1 водоем К-2). Водоем К-2 охарактеризован «нулевым» уровнем рекреационной значимости, так как не обладает рекреационным потенциалом (неблагоприятные условия для рекреации – расположен между приусадебными участками, берега крутые, обрывистые, дно неровное, илистое, загрязнено бытовым мусором, площадь водного зеркала менее 3 га, покрытие береговой линии макрофитами более 20 %, отсутствие зон купания и пляжа, уличный туалет приусадебного участка расположен на расстоянии до 10 м от береговой линии водоема). Это пруд-копань, основная задача которого понижение уровня грунтовых вод.

Таким образом, большинство исследованных городских водоемов характеризуются средним уровнем рекреационной значимости – 53,3 % (8 водоемов). Низким уровнем рекреационной значимости характеризуются 33,3 % (5 водоемов) и «нулевым» – 10,7 % (2 водоема).

Таблица 4. Показатели уровня рекреационной значимости водоемов урбанизированных территорий**Table 4. Indicators of the level of recreational significance of reservoirs in the urban areas**

Уровень рекреационной значимости, балл	Характеристика уровня рекреационной значимости
Высокий	<i>Рекреационно-благополучные</i> – водоемы, находящиеся в хорошем и удовлетворительном экологическом и санитарно-гигиеническом состоянии, используемые населением в различных видах рекреации, обладающие рекреационным и культурно-историческим потенциалом
Средний	<i>Рекреационно-значимые</i> – водоемы, находящиеся в удовлетворительном экологическом и санитарно-гигиеническом состоянии, обладающие высокой эстетической нагрузкой и используемые населением контактных видов рекреации
Низкий	<i>Рекреационно-малозначимые</i> – водоемы, находящиеся в удовлетворительном экологическом состоянии, берега которых используются для бесконтактных видов рекреации и обладающие незначительным рекреационным потенциалом (или в плохом экологическом состоянии с значительным рекреационным потенциалом), которые не могут быть использованы для организации зон активной рекреации, однако для них возможна разработка проектов по повышению рекреационного потенциала или экологической защиты (охраны) либо реабилитации до удовлетворительного экологического состояния
«Нулевой»	<i>Рекреационно-незначимые</i> – водоемы, находящиеся в плохом экологическом состоянии (или в состоянии деградации) и не обладающие рекреационным потенциалом (или с незначительным рекреационным потенциалом), которые не используются населением в рекреационных целях, для которых невозможна или нецелесообразна реабилитация до удовлетворительного экологического состояния

Таблица 5. Рекреационная значимость водоема в зависимости от вида антропогенной нагрузки за 2020 г.**Table 5. Recreational significance of the reservoir depending on the type of anthropogenic load for 2020**

Водоем / экологическое состояние	Вид антропогенной нагрузки	Уровень рекреационной значимости
К-1 плохое	Место отдыха (прогулки вдоль берега, принятие воздушных и солнечных ванн), укрепление склона берега набережной и ж/б плитами, поверхностный сток с территории водосбора, катание на катамаранах	Средний, элемент пейзажа парка, высокая эстетическая нагрузка*, исторически ценный
К-2 плохое	Место отдыха (прогулки вдоль берега (тропинка)), поверхностный сток с территории водосбора	«Нулевой»
Ж-1 удовлетворительное	Место отдыха, дикий пляж, поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство	Средний, элемент пейзажа парка, высокая эстетическая нагрузка*, биологически ценный (место обитания 1-го вида Красной книги Республики Беларусь)
Ж-2 хорошее	Любительское рыболовство, поверхностный сток с территории водосбора	Низкий, биологически ценный (место обитания 2-х видов Красной книги Республики Беларусь)
Ж-3 удовлетворительное	Место отдыха (прогулки вдоль берега, пляжный отдых, купание), поверхностный сток с территории водосбора, катание на лодках, скутерах, любительское рыболовство	Средний, использование для контактных видов рекреации
М-1 удовлетворительное	Место отдыха (прогулки вдоль берега, пляжный отдых, купание), поверхностный сток с территории водосбора, укрепление склона берега набережной катание на катамаранах, любительское рыболовство	Средний, элемент пейзажа парка, высокая эстетическая нагрузка*, контактная рекреация

Водоем / экологическое состояние	Вид антропогенной нагрузки	Уровень рекреационной значимости
М-2 удовлетворительное	Место отдыха (прогулки вдоль берега, принятие воздушных и солнечных ванн), поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство	Низкий, высокая эстетическая нагрузка*
М-3 плохое	Место отдыха (принятие воздушных и солнечных ванн), поверхностный сток с территории водосбора	Низкий, низкая эстетическая нагрузка*
М-4 удовлетворительное	Место отдыха (принятие воздушных и солнечных ванн), поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство	Низкий, высокая эстетическая нагрузка*, низкая степень контактной рекреации
Б-1 удовлетворительное	Поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство	Низкий, высокая эстетическая нагрузка*, низкая степень контактной рекреации
Б-2 удовлетворительное	Поверхностный сток с территории водосбора, место отдыха	Средний, высокая эстетическая нагрузка*, низкая степень контактной рекреации
Б-3 плохое	Место отдыха, поверхностный сток с территории водосбора	Средний, элемент пейзажа парка, высокая эстетическая нагрузка*, низкая степень контактной рекреации, исторически ценный
Б-4 удовлетворительное	Поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство, место отдыха	Средний, высокая эстетическая нагрузка*, используется для контактной рекреации
Б-5 удовлетворительное	Поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство	Низкий, высокая эстетическая нагрузка*, низкая степень контактной рекреации
Б-6 удовлетворительное	Поверхностный сток с территории водосбора, любительское рыболовство, место отдыха	Средний, высокая эстетическая нагрузка*, низкая степень контактной рекреации

*Эстетическая нагрузка на водный объект является составляющей эстетики природного ландшафта. По определению Ю. П. Хрусталёва эстетика водоема характеризуется как степень красоты, индивидуальность водоема, его привлекательность для человека, необходимая для сохранения психического здоровья и нормального отдыха людей, удовлетворения их рекреационных потребностей [17].

Исходя из анализа данных по уровню рекреационной значимости урбанизированных водоемов юго-запада Беларуси (табл. 4) можно утверждать что *рекреационно-значимые* урбанизированные водоемы характеризуются следующими гидроморфологическими параметрами и характеристикой водосборов: водоемы природно-антропогенного происхождения, близкие к овальным и округлым формам, озерным типом котловин, с различным характером склона, расположенные предпочтительно в парковой зоне либо в частном секторе, используемые в бесконтактных и контактных видах рекреации.

Рекреационно-малозначимые урбанизированные водоемы характеризуются следующими гидроморфологическими параметрами и параметрами водосборов: водоемы природно-антропогенного и антропогенного происхождения, различных форм, карьерным типом котловин, с смешанным характером склона, характеризующиеся относительно высокой плотностью населения водосбора либо в частном секторе, малой рекреационной нагрузкой (бесконтактные виды рекреации).

Рекреационно-незначимые урбанизированные водоемы характеризуются следующими гидроморфологическими параметрами и параметрами водосборов: водоемы антропогенного происхождения, различных форм, карьерным типом котловин, с крутым или обрывистым склоном берега, характеризующиеся высокой трансформацией площади водосбора либо расположенные в частном секторе, а так же с незначительной рекреационной нагрузкой (любительская ловля рыб).

Уровень антропогенной трансформации определяли по сравнительной характеристике гидроморфологических показателей и параметров водосборов исследованных урбанизированных водоемов с показателями водных объектов для безопасного рекреационного использования.

Показатели безопасности использования поверхностных водных объектов в целях отдыха, спорта и туризма указаны в приложении 1 экологических норм и правил ЭкоНиП 17.06.08-003-2022 [9], которые применимы и для водоемов урбанизированных территорий. При установлении воз-

возможности использования водного объекта для рекреации нами применялись следующие основные параметры: площадь поверхности воды, колебание уровня воды, уклон склона берега в сторону береговой линии, коэффициент извилистости, литологический состав грунта берега и мелководья. В табл. 5 показаны результаты анализа рекреационной привлекательности исследованных урбанизированных водоемов по данным показателям.

Таблица 5. Показатель безопасности использования водоемов в целях рекреации, спорта и туризма по ЭкоНiП 17.06.08–001–2022

Table 5. The indicator of the safety of the use of reservoirs for recreation, sports and tourism according to EcoNiP 17.06.08–001–2022

Водоем	К-1	К-2	Ж-1	Ж-2	Ж-3	М-1	М-2	М-3	М-4	Б-1	Б-2	Б-3	Б-4	Б-5	Б-6
Показатели безопасности	Неблагоприятно	Неблагоприятно	Относительно благоприятно	Неблагоприятно	Относительно благоприятно	Относительно благоприятно	Неблагоприятно	Неблагоприятно	Относительно благоприятно	Неблагоприятно	Неблагоприятно	Неблагоприятно	Неблагоприятно	Неблагоприятно	Относительно благоприятно

Установлено, что все водоемы г. Кобрин характеризуются неблагоприятными условиями безопасности в целях рекреации, спорта и туризма; 66,7 % исследованных водоема г. Жабинки характеризуются относительно благоприятными условиями; 83,3 % водоемов г. Бреста характеризуются неблагоприятными показателями безопасности. Следовательно, для юго-запада Беларуси прослеживается тенденция распространения урбанизированных водоемов с низким (неблагоприятным) показателем безопасности использования в целях рекреации, спорта и туризма (66,7 % водоемов) и только 33,3 % исследованных водоемов характеризуется относительно благоприятными условиями.

На изменение характеристик гидроморфологических показателей городских водоемов в значительной степени оказывает влияние антропогенный фактор, выраженный нами как уровень антропогенной трансформации. Таким образом, по уровню антропогенной трансформации водоемы урбанизированных территорий классифицированы нами на пять групп (табл. 6): а) «нулевую»; б) незначительную; в) частичную; г) значительную; д) полную. В качестве основного параметра уровня антропогенной трансформации нами определен показатель безопасности использования водоемов в целях рекреации, спорта и туризма, а так же характер и величина трансформирования водоема в результате антропогенного воздействия. Чем меньше антропогенное вмешательство на водоем и выше показатель безопасности для рекреации, спорта и туризма, тем ниже уровень антропогенной трансформации водоема.

Таблица 6. Показатели уровня антропогенной трансформации водоемов

Table 6. The Indicators of the level of anthropogenic transformation of the reservoirs

Уровень антропогенной трансформации	Характеристика антропогенной трансформации
«Нулевая» трансформация	Благоприятный показатель безопасности для рекреации, характеризуется незначительным антропогенным вмешательством (до 5 %), а так же в случае, когда водоем сохранил свой первоначальный облик
Незначительная трансформация	Благоприятный или относительно благоприятный показатель безопасности для рекреации, характеризуется инженерным обустройством части береговой линии или изменением литологического состава дна водоема до 30 %
Частичная трансформация	Относительно благоприятный показатель безопасности для рекреации, характеризуется полным (или частичным) изменением береговой линии, трансформация от 30 до 60 %
Значительная трансформация	Неблагоприятный показатель безопасности для рекреации, характеризует водоемы, часть площади которых (более 60 %) утрачена (засыпана или осушена)
Полная трансформация	Неблагоприятный показатель безопасности для рекреации характеризует полностью утраченные водоемы, или трансформированные в подземные водные объекты, или технологические водоемы

Характеристика типичных водоемов урбанизированных территорий юго-запада Беларуси по уровням антропогенной трансформации показана в табл. 7.

Таблица 7. Показатели антропогенной трансформации водоемов урбанизированных территорий юго-запада Беларуси

Table 7. Indicators of anthropogenic transformation of water bodies in urbanized areas of southwestern Belarus

Водоем	Вид антропогенной трансформации	Уровень антропогенной трансформации
К-1	Часть берега укреплена набережной, бетонными блоками со стороны ротонды, часть дна загрязнена строительным мусором ($\approx 50\%$)	Частичная трансформация
К-2	Береговая линия естественная, часть дна загрязнена строительным мусором, автомобильными шинами	Незначительная трансформация
Ж-1	Часть берега укреплена набережной	Незначительная трансформация
Ж-2	Береговая линия естественная, мостик для любительского рыболовства	«Нулевая» трансформация
Ж-3	Берега укреплены дамбой, бетонные блоки со стороны насосной станции	Частичная трансформация
М-1	Часть берега укреплена набережной, пляжная зона	Частичная трансформация
М-2	$\approx 30\%$ береговой линии спрямлено	Незначительная трансформация
М-3	$\approx 20\%$ береговой линии спрямлено	Незначительная трансформация
М-4	Береговая линия естественная	«Нулевая» трансформация
Б-1	35% береговой линии спрямлено	Частичная трансформация
Б-2	Часть берега укреплена набережной, возле набережной дно загрязнено строительным мусором	Незначительная трансформация
Б-3	Береговая линия спрямлена (полностью изменена), $\approx 3\%$ укреплено бетонной лестницей	Частичная трансформация
Б-4	Береговая линия естественная, дикий пляж, места для любительского рыболовства	«Нулевая» трансформация
Б-5	Береговая линия естественная, места для любительского рыболовства	«Нулевая» трансформация
Б-6	Береговая линия естественная, дикий пляж, места для любительского рыболовства	Незначительная трансформация

Результаты исследования уровня антропогенной трансформации водоемов урбанизированных территорий юго-запада Беларуси показывают, что водоемы трансформированы в разной степени. Они характеризуются «нулевой», незначительной или частичной трансформацией приблизительно в равных соотношениях.

Водоемы с «нулевой» трансформацией характеризуются неблагоприятными условиями безопасности использования водоемов в целях рекреации, спорта и туризма: труднодоступное (Ж-2), берега крутые или обрывистые, дно неровное, песчаное или глинистое, заросшее высшей водной растительностью. Для водоемов с незначительной антропогенной трансформацией характерны относительно благоприятные или неблагоприятные условия безопасности использования водоемов в целях рекреации, спорта и туризма: береговая линия спрямлена до 30% или укреплена набережной либо характерно загрязнение дна водоема мусором. Водоемы с частичной антропогенной трансформацией характеризуются относительно благоприятными (или неблагоприятными) условиями безопасности использования водоемов в целях рекреации, спорта и туризма: береговая линия спрямлена более чем на 30% , укреплена набережной или бетонными конструкциями, характеризуются загрязнением дна водоема. Значительная или полная трансформация для водоемов урбанизированных территорий не характерна.

Выводы.

1. Исходя из изученных гидроморфологических показателей водоемов и их водосборов типичными для урбанизированных водных объектов юго-запада Беларуси являются неглубокие (до 5 м) водоемы природно-антропогенного происхождения незначительной площади (до 1 км^2) с замедленным водообменном (в основном непроточные). Преобладают близкие к овальной и округлой форме озерные и карьерные котловины. Они характеризуются слабоизвилистой, естественной,

с различным характером склона береговой линией. Изменение береговой линии происходит в основном за счет антропогенного воздействия в виде спрямления берегов и укрепления берегов набережными либо железобетонными плитами.

2. При комплексной оценке экологического состояния урбанизированных водоемов немаловажное значение имеют характер антропогенного воздействия и рекреационный потенциал водного объекта. Они характеризуют рекреационную привлекательность урбанизированных водоемов. Индикаторами рекреационной привлекательности урбанизированных водоемов юго-запада Беларуси служат разработанные нами следующие показатели: уровень рекреационной значимости, уровень антропогенной трансформации.

3. Установлено, что в большинстве случаев водоемы урбанизированных территорий юго-запада Беларуси характеризуются средним или низким уровнем рекреационной значимости (86,7 %). Для 66,7 % водоемов характерны неблагоприятные условия по безопасности для использования водоемов в целях рекреации, спорта и туризма. Для урбанизированных водоемов юго-запада Беларуси характерны различные уровни антропогенной трансформации, которые не приводят к ухудшению их экологического состояния.

Список использованных источников

1. Овчарова, Е. П. Геоэкологические критерии для целей реабилитации водных объектов на урбанизированных территориях / Е. П. Овчарова, О. В. Кадацкая // Природопользование. – 2014. – Вып. 26. – С. 25–30.
2. Кириченко, Л. А. Исследование эколого-рекреационной значимости некоторых водоемов г. Бреста / Л. А. Кириченко // Перспективные методы очистки природных и сточных вод : сб. ст. регион. науч.-тех. конф., Брест, 26 сент. 2019 г. / Министерство образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т, Кафедра водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ; редкол.: С. Г. Белов [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 68–71.
3. Томаш, М. С. Рекреационный потенциал лимносистем г. Гомеля / М. С. Томаш // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2020. – № 2. – С. 148–156.
4. Власов, Б. П. Природно-хозяйственная классификация озер Беларуси / Б. П. Власов // Выбранные научовыя працы БДУ. – Минск, 2001. – С. 315–332.
5. Малоземова, О. В. Морфометрическая характеристика озер в различных ландшафтах востока Ленинградской области / О. В. Малоземова // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Сер. Естественные науки. – СПб. : РГПУ им. А. И. Герцена, 2012. – № 114. – С. 112–121.
6. Лопух, П. С. Общая лимнология [Электронный ресурс] : пособие для студентов геогр. фак. / П. С. Лопух, О. Ф. Якушко. – Минск : БГУ, 2011. – Режим доступа: <http://www.elib.bsu.by>. – Дата доступа: 15.09.2023.
7. Требования к содержанию поверхностных водных объектов при их рекреационном использовании. СНИП, утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 5 дек. 2016 г., № 122. – 28 с.
8. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Комплексная оценка экологического риска и расчет норм допустимых рекреационных нагрузок на водоемы в зонах отдыха Беларуси : ТКП 17.06-17-2018 (33140), ВУ. – Введ. 01.06.19. – Минск : Минприроды, 2019. – III, 19 с.
9. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Требования по содержанию поверхностных водных объектов в надлежащем состоянии и их благоустройству : ЭкоНИП 17.06.08-003-2022. – Введ. 15.05.2022. – Минск : Минприроды, 2022. – 28 с.
10. Горкин, А. П. География / А. П. Горкин. – М. : Росмэн-Пресс, 2006. – 624 с.
11. Николаев, В. А. Природно-антропогенные ландшафты (сельскохозяйственные и лесохозяйственные) : учеб. пос. / В. А. Николаев, И. В. Копыл, В. В. Сысуев ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М. : Географ. фак. МГУ, 2008. – 158 с.
12. Дедю, И. И. Экологический энциклопедический словарь / И. И. Дедю. – Кишинев : Гл. ред. Молд. совет. энцикл., 1989. – 406 с.
13. Кириченко, Л. А. Экологическое состояние городских водоемов юго-запада Беларуси в весенний период 2020 г. / Л. А. Кириченко, А. А. Волчек // Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац / Нац. акад. навук Беларусі, Палескі агр.-экал. ін-т, рэдкал.: М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Минск : Беларуская навука, 2022. – Вып. 13. – С. 117–120.
14. Эколого-гидрохимическое состояние водоемов урботерриторий юго-запада Беларуси в зимний период / Л. А. Кириченко [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер.: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 80–82.

15. Kirichenko, L. Ecological condition of water bodies of the south-west of Belarus in spring 2020 / L. Kirichenko, A. Volchak, A. Golovach // 2020 Int. Conf. on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2020). – 2020. – Vol. 212. – 11 p. – doi:10.1051/e3sconf/202021201007
16. Кириченко, Л. А. Трансформация экологического состояния водоемов г. Бреста в 2020 г. по гидрохимическим показателям / Л. А. Кириченко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 2 (125). – С. 86–89.
17. Хрусталева, Ю.П. Эколого-географический словарь / М-во общ. и проф. образования РФ, СКНЦ ВШ, РГУ ; отв. ред. Г. Г. Матишов. – Батайск : Батайск. книжн. изд-во, 2000. – 198 с.

References

1. Ovcharova E. P., Kadackaya O. V. *Geoekologicheskie kriterii dlya celej rehabilitacii vodnyh ob'ektov na urbanizirovannyh territoriyah* [Geoecological criteria for the purpose of stabilizing reservoirs in the urban areas]. *Nature Management*, 2014, no. 26, pp. 25–30. (in Russian)
2. Kirichenko L. A. *Issledovanie ekologo-rekreacionnoj znachimosti nekotoryh vodoemov g. Bresta* [Study of the ecological and recreational significance of some reservoirs in city of the Brest]. *Perspektivnye metody ochistki prirodnih i stochnyh vod. Sbornik statej regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Proc of Sci. and Tech. Conf. 'Promising methods for treating natural and waste waters']. Brest, 2019, pp. 68–71. (in Russian)
3. Tomash M. S. *Rekreacionnyj potencial limnosistem g. Gomelya* [Recreational potential of the limnosystem of the city of Gomel]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Himiya. Biyalogiya. Navuki ab zyamli = Bulletin of Brest University. Ser. 5, Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2020, no. 2, pp. 148–156. (in Russian)
4. Vlasov B. P. *Prirodno-hozyajstvennaya klassifikaciya ozer Belarusi* [Natural and economic classification of the lakes in Belarus] *Vybranyya navukovyja pracy BDU = Selected scientific works of BSU*, 2014, Minsk, pp. 315–332. (in Russian)
5. Malozemova O. V. *Morfometricheskaya harakteristika ozer v razlichnyh landschaftah vostoka Leningradskoj oblasti* [Morfometric characteristics of lakes in various landscapes of the east of the Leningrad region] *Izvestiya Rossijskogo gosudartvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gercena. Ser. Estestvoznaniye = Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, 2012, no. 114, pp. 112–121. (in Russian)
6. Lopuh P. S., Yakushko O. F. *Obshchaya limnologiya* [General limnology]. Minsk, 2011. Available at: <http://www.elib.bsu.by/> (accessed 15 September 2023). (in Russian)
7. *SniP Trebovaniya k soderzhaniyu poverhnostnyh vodnyh ob'ektov pri ih rekreacionnom ispol'zovanii* [Requirements for the maintenance of surface reservoirs during their recreational use]. Resolution no. 122. Ministry of Health of the Republic of Belarus, 2016, 28 p. (in Russian)
8. *TCP 17.06-17-2018. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrosfera. Kompleksnaya ocenka ekologicheskogo riska i raschet norm dopustimyh rekreacionnyh nagruzok na vodoemy v zonah otdyha Belarusi* [Environmental protection and nature management. Hydrosphere. Comprehensive assessment of environmental risk and calculation of norms for permissible recreational loads on reservoirs in recreation areas of Belarus]. Minsk, 2019, 19 p. (in Russian)
9. *EkoNiP 17.06.08-003-2022. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrosfera. Trebovaniya po soderzhaniyu poverhnostnyh vodnyh ob'ektov v nadležashchem sostoyanii i ih blagoustrojstvu* [Environmental protection and nature management. Hydrosphere. Requirements for maintaining surface reservoirs in proper condition and their improvement]. Minsk, 2022, 28 p. (in Russian)
10. Gorkin A.P. *Geografiya* [Geography]. Moscow, 2006. 624 p. (in Russian)
11. Nikolaev V. A., Kopyl I. V., Sysuev V. V. *Prirodno-antropogennyye landshafty (sel'skohozyajstvennyye i lesohozyajstvennyye)* [Natural-anthropogenic landscapes (agricultural and forestry)]. Moscow, 2008. 158 p. (in Russian)
12. Dediu I. I. *Ekologicheskij enciklopedicheskij slovar'* [Ecological encyclopedic dictionary]. Chisinau, 1989. 406 p. (in Russian)
13. Kirichenko L. A., Volchak A. A. *Ekologicheskoe sostoyanie gorodskih vodoemov yugo-zapada Belarusi v vesen'nyj period 2020 goda* [Ecological condition of urban reservoirs in the southwest of the Belarus in the spring of 2020]. *Pryrodnae asyaroaddze Palessya: asablivasci i perspektyvy razvycyja. Zbornik navukovyh prac* [Proc. of Sci. works 'The natural environment of Polesia: features and development prospects']. Minsk, 2022, no. 13, pp. 117–120. (in Russian)
14. Kirichenko L. A. [et al.]. *Ekologo-gidrokhimicheskoe sostoyanie vodoemov urboterritorii yugo-zapada Belarusi v zimnij period* [Ecological and hydrochemical state of water reservoir in the urban areas of the south-west of Belarus in winter]. *Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Water management construction, heat power engineering and geoecology*. 2020, no. 2, pp. 80–82. (in Russian)
15. Kirichenko L., Volchak A., Golovach A. Ecological condition of water bodies of the south-west of Belarus in spring 2020. 2020 Int. Conf. on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2020). Brest, 2020, no 212, 11 p. doi:10.1051/e3sconf/202021201007

16. Kirichenko L. A. *Transformatsiya ekologicheskogo sostoyaniya vodoemov g. Bresta v 2020 g. po gidrokhimicheskim pokazatelyam* [Transformation of the ecological state of water bodies in Brest in 2020 by hydrochemical indicators]. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2021, no. 2 (125), pp. 86–89. (in Russian)
17. Khrustalev Yu. P. *Ekologo-geograficheskij slovar'* [Ecological-geographical dictionary]. Ed. G. G. Matishov. Brest, 2000. 198 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кириченко Лариса Александровна – магистр биологических наук, старший преподаватель, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: lakobrinetch@mail.ru

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

Information about the authors

Larysa A. Kirichenko – Master of Biological Sciences, Researcher, Senior Lecturer, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: lakobrinetch@mail.ru

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-68-77>
УДК 504.054+504.53+504.4.054

Поступила в редакцию 29.03.2024
Received 29.03.2024

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЛИСТИРОЛОМ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН МАЛЫХ РЕК НА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Т. И. Кухарчик, К. О. Рябычин, В. Д. Чернюк, А. А. Мелешко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Полистирол является одним из наиболее широко производимых и используемых полимеров, который при попадании в окружающую среду рассеивается с воздушными массами и поверхностным стоком. В статье представлены результаты изучения содержания частиц полистирола в прибрежных зонах руч. Мышка и р. Лошица на территории г. Минска.

Полевые исследования выполнены с использованием маршрутного метода с визуальным определением отходов пенополистирола и гранул полистирола вдоль береговой линии (в воде, на почве и растительности). Общая длина маршрута составила около 9 км.

Установлено, что прибрежные зоны руч. Мышка и р. Лошица практически по всей длине загрязнены фрагментами пенополистирольных плит, вспененными и вспенивающимися гранулами полистирола. Размеры частиц варьируют от 1–2 мм до нескольких сантиметров. Наиболее загрязненными участками является пойма в средней части руч. Мышка вблизи предприятия по производству пенополистирольных плит и район технологических прудов в юго-западной части г. Минска. Высокий уровень загрязнения прибрежной зоны характерен для участков пойм руч. Мышка и р. Лошица, где образовались естественные барьеры из деревьев, кустарниковой и травянистой растительности.

Установлено, что источниками поступления частиц полистирола являются поверхностные воды руч. Мышка, в верховье которого расположено предприятие по производству пенополистирольных плит, а также ливневые воды коллекторов, дренирующих значительную часть городской территории. Обсуждена необходимость дальнейших исследований с изучением содержания частиц микропластика лабораторными методами.

Ключевые слова: полистирол; пенополистирольные изделия; прибрежная зона; пойма; загрязнение.

Для цитирования. Кухарчик Т. И., Рябычин К. О., Чернюк В. Д., Мелешко А. А. Загрязнение полистиролом прибрежных зон малых рек на урбанизированной территории // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 68–77.

POLYSTYRENE POLLUTION OF THE COASTAL ZONES OF SMALL RIVERS IN AN URBAN AREA

T. I. Kukharchyk, K. O. Ryabychyn, V. D. Chernyuk, A. A. Meleshko

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

Abstract. Polystyrene is one of the most widely produced and used polymers, which, when released into the environment, disperses with air masses and surface runoff. The article presents the results of a study of the content of polystyrene particles in the coastal zone of the stream Myshka and Loshitsa river, Minsk.

Field research was carried out using the route method with visual identification of waste polystyrene foam and polystyrene granules along the coastline (in water, on soil and vegetation). The total length of the route was about 9 km.

It has been established that the coastal zones of the stream Myshka and Loshitsa river is contaminated along almost its entire length with fragments of polystyrene foam boards, foamed and expanding polystyrene granules. Particle sizes vary from 1-2 mm to several centimeters. The most polluted areas are the floodplain in the middle part of the stream Myshka near an enterprise for the production of polystyrene foam boards and the area of technological ponds in the South-Western part of Minsk. A high level of pollution of the coastal zone is typical for the floodplain areas of the stream Myshka and Loshitsa river, where natural barriers of trees, shrubs and herbaceous vegetation have formed.

It has been established that the sources of polystyrene particles are the surface waters of the stream Myshka, in the upper reaches of which there is an enterprise for the production of polystyrene foam boards, as well as storm water from sewers that drain a significant part of the urban area. The need for further research examining the content of microplastic particles using laboratory methods is discussed.

Keywords: polystyrene; polystyrene foam products; coastal zone; floodplain; pollution.

For citation. Kukharchyk T. I., Ryabychyn K. O., Chernyuk V. D., Meleshko A. A. Polystyrene pollution of the coastal zones of small rivers in an urban area. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 68–77.

Введение. Загрязнение компонентов природной среды полистиролом, как и другими видами полимерных изделий и отходов, относится к одной из приоритетных экологических проблем современности [1]. Среди всего разнообразия полимерных материалов полистирол является одним из приоритетных по масштабам производства и применения (после полиэтилена, полипропилена и ПВХ). По состоянию на 2015 г. объемы производства полистирола в глобальном масштабе составили 25 млн т, или 7,6 % общего объема производства полимеров [2].

Полистирол производится в виде мелких гранул для последующего производства вспененного, экструдированного и ударопрочного полистирола, а также сополимеров. Гранулы полистирола, являющиеся первичными полимерами, чаще всего представляют собой частички сферической формы, белого или молочного цвета размером от 0,5 до 2 мм с плотностью выше 1 г/см^3 (рис. 1). Реже встречается полистирол черного цвета, который производится с добавками графита. Изделия из полистирола, в том числе пенополистирольные плиты (пенопласт), на 98 % состоят из воздуха, а их плотность находится в диапазоне $0,028\text{--}0,035 \text{ г/см}^3$.

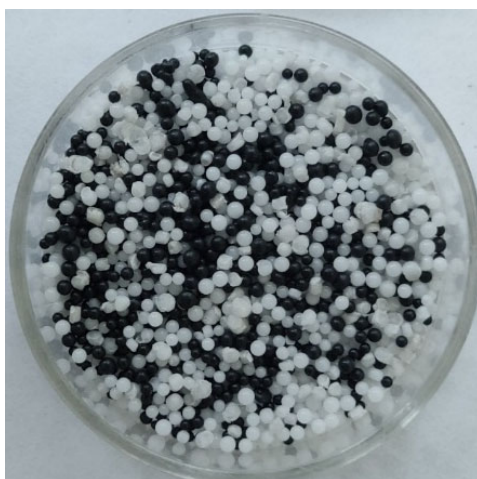


Рис. 1. Смесь белых и черных гранул первичного полистирола для производства пенополистирольных плит

Fig. 1. A mixture of white and black granules of primary polystyrene for the production of expanded polystyrene boards

Впервые гранулы первичного полистирола были идентифицированы в прибрежных водах южной части Новой Англии более 40 лет назад [3, 4]. В настоящее время фрагменты пенопласта, вспененные гранулы, микрошарики обнаруживаются в почвах различных регионов [5–8]. К источникам полистирола относятся строительные и упаковочные материалы, контейнеры для пищевых продуктов и другие изделия, которые превращаются в отходы после истечения срока службы. Способность таких изделий легко разламываться и крошиться, быстро переноситься с ветром и водой обусловила их рассеяние в окружающей среде.

В Беларуси полистирол используется для производства теплоизоляционных полистирольных плит (пенопласта различных марок), стеновых сэндвич-панелей с пенополистиролом, упаковочного материала, наполнителей и других изделий. Ежегодные объемы применения полимеров стирола на основании данных их импорта и экспорта оцениваются в 60–65 тыс. т с незначительными вариациями за последние 10 лет [9].

Выполненные недавно первые исследования в зоне воздействия промышленного предприятия по производству пенополистирольных плит в г. Минске показали, что рассеяние гранул сырья полистирола (размером $<2 \text{ мм}$) и отходов производимой продукции (в виде вспененных гранул и крошки пенопласта) приводит к загрязнению почв не только на промплощадке, но и за ее пределами, в том числе почвы пойменного участка руч. Мышка [10]. Было установлено, что миграция частиц полистирола осуществляется, прежде всего, с поверхностным стоком. Это означает, что не исключено их поступление вниз по течению и перенос полистирола в принимающие водотоки – р. Лошица и далее – р. Свислочь.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования явились прибрежные зоны водотоков, протекающих в юго-западной части г. Минска: канал Грушевский, руч. Мышка и р. Лошица (до ее впадения в р. Свислочь). Исследования выполнены в летний-осенний период 2022 г. Общая длина маршрута составила около 9 км (рис. 2).

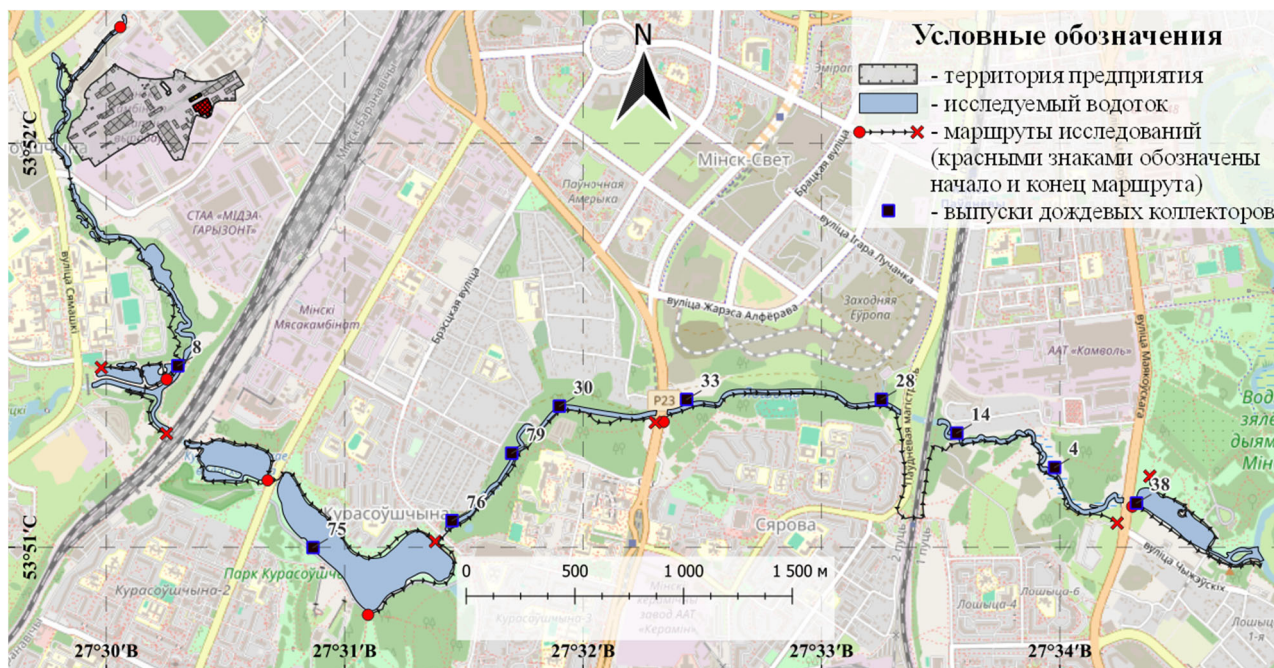


Рис. 2. Общий вид маршрута исследования прибрежных зон руч. Мышка и р. Лошица

Fig. 2. General view of the route for exploring the coastal zones of the Myshka creek and the Loshitsa River

Руч. Мышка (прежнее название р. Мухля) – левый приток р. Лошица, его исходная длина составляла около 7 км. После строительства водозабора Петровщина длина реки сократилась [11] русло значительно обмелело и в летний сезон в верхней части пересыхает. По состоянию на 2024 г. длина водотока составляет менее 4 км (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики исследуемых водотоков, согласно водному кадастру

Table 1. Characteristics of the studied watercourses, according to the water cadastre

Реестровый номер водного кадастра	Наименование водотока	Протяженность водотока, км	Протяженность исследования в рамках работы, км
2938	Канал Грушевский	2,85	0,45
2937	Ручей Мышка	3,96	1,97
2636	Река Лошица	12	6,70

Прибрежная зона, начиная с ул. Железнодорожной, практически не обустроена и представлена естественной, преимущественно древесно-кустарниковой растительностью. Впадает в р. Лошица перед железнодорожным переездом в районе ул. Семашко.

Река Лошица является правым притоком р. Свислочь; первоначальная длина составляла 12 км, площадь водосбора – 67 км² [12]. В микрорайоне Курасовщина создано водохранилище Лошица, на берегу которого расположен парк, а в устье, в районе Лошицкого парка, – пруд.

Полевые исследования выполняли с использованием маршрутного метода с визуальным определением различных видов полистирола вдоль береговой линии (в воде, на почве и тканях растений). Во время маршрута место загрязнения зафиксировали с помощью GPS и нанесли на карту. Провели фотофиксацию и описание выявленного загрязнения с выделением различных типов отходов или гранул сырья.

Водотоки дренируют значительную часть городской территории, включая промышленные, жилые, транспортные и рекреационные зоны. Река Лошица пересекается несколькими крупными транспортными узлами, на ней созданы три водохранилища [13]. Общие сведения об исследуемых водотоках приведены в табл. 1.

Река Лошица принимает воды девяти ливневых коллекторов, собирающих ливневые и нормативно очищенные сточные воды предприятий юго-западной части г. Минска. Имеются выпуски дождевых коллекторов также в руч. Мышка (в районе ул. Семашко).

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования, начиная от канала Грушевского до впадения р. Лошица в р. Свислочь, выделено 17 участков, для которых выполнено описание состояния прибрежных зон и дана оценка их загрязнения полистиролом (табл. 2).

Таблица 2. Результаты визуального обследования поймы р. Лошица и принимающих водотоков

Table 2. The results of a visual survey of the Loshitsa river floodplain and receiving watercourses

№	Описание участка водотока		Загрязнение пенополистиролом
	Расположение	Общая характеристика	
1.	Канал Грушевский от автостанции Юго-Западной до перекрестка на пересечении улиц Железнодорожной и Семашко	Русло изменено. Высокие берега (до 7–8 м); кустарниковая растительность по бровке. Левый берег – гаражный кооператив. Русло сухое на большем протяжении канала. Перед впадением в руч. Мышка затопленный участок	В 20 м от начала затопленного участка – фрагменты пенополистирольных плит. Вспененные гранулы встречаются у кромки и на поверхности воды. На входе в коллектор – завал из веток, бурелома и водной растительности. Обилие полистирола в виде отдельных вспененных гранул и фрагментов пенополистирольных плит
2.	Руч. Мышка от ул. Железнодорожной до коллектора на ул. Софьи Ковалевской	Затапливаемый участок; пойма расширяется до 100 м; имеются остатки небольших старичных водоемов и старое русло, пересыхающие (или сильно мелеющие) в летний сезон. Ивняк тростниковый. Левый берег – промплощадка предприятия	Обилие отходов полистирола, особенно у склона, прилегающего к промплощадке. Местами вспененные гранулы полистирола образуют сплошной покров. Фрагменты и осколки пенополистирольных плит. При закладке прикопки в пойме обнаружен пенополистирол на глубине более 30 см
3.	Руч. Мышка от коллектора до места впадения в р. Лошица в районе технологических прудов на ул. Семашко	Пойма сильно заболочена, закустарена, труднопроходима. Признаки регулярного подтопления. Имеются необорудованные места любительской рыбалки	На протяжении всего участка встречаются вспененные гранулы полистирола и обломки полистирольных плит. Полистирол зафиксирован на почве прибрежной зоны и растительности на различной высоте от уреза воды
4.	Технологические пруды на ул. Семашко	Участок с измененным руслом. Пруды оснащены каскадами для удаления механического мусора, плавающего на поверхности	Загрязнение гранулами полистирола почв в местах вероятного разлива воды из технологического пруда. Сильное загрязнение прибрежных зон, бетонных конструкций. Сплошной покров из полистирола в местах сужения водотоков (шлюзы, соединительные коллекторы). Мор рыбы
5.	р. Лошица от технологических прудов до коллектора под ж/д мостом ниже по течению	Следы весеннего паводка; древесно-кустарниковая растительность; имеются открытые участки с выходом к воде. В местах неорганизованного отдыха следы кострищ	Гранулы полистирола и небольшие фрагменты плит встречаются на берегу даже выше по течению р. Лошица от места впадения руч. Мышка
6.	Курасовщинское водохранилище (левый берег)	На воде обилие ряски. Для укрепления откосов и насыпи автомобильной дороги уложены железобетонные плиты, имеются необорудованные места любительской рыбалки	На поверхности воды, на водной растительности и берегу гранулы и отдельные куски полистирола. Полистирол в виде вспененных гранул обнаруживается под опавшей листвой
7.	Курасовщинское водохранилище (правый берег) в районе дубо-липового массива «Белая дача»	Зона рекреации. Для укрепления откосов и насыпи автомобильной дороги уложены железобетонные плиты. На воде обилие ряски. В начале парка береговая линия нарушена строительной техникой	На нарушенном участке на грунте, а также на поверхности воды обнаруживаются гранулы полистирола. Гранулы встречаются как целые, так и сильно деформированные, поврежденные
8.	Водохранилище Лошица	Зона рекреации. Много мест любительской рыбалки. Имеются необорудованные пляжи. В конце водохранилища водоток бетонирован, уровень регулируется шлюзом	Поверхность воды чистая, бытового и строительного мусора не обнаружено
9.	р. Лошица от ул. Брестской до ул. Зубачева	Участок сильно заросший, пойма сильно размита. Имеются места с сильными заторами на водотоке	Большое количество бытового мусора. Фрагменты пенополистирола встречаются повсеместно, в особенности в местах сильных заторов. В местах постоянного пребывания людей встречаются крупные куски пенополистирола. Замечен мор рыбы

№	Описание участка водотока		Загрязнение пенополистиролом
	Расположение	Общая характеристика	
10.	Участок водотока р. Лошица от ул. Зубачева до ул. Кижеватова	Участок похож на № 9, берега более пологие, меньше заторов и мусора, пойма реки четко выделена и дифференцируется. Есть места с каменистыми порогами по течению	Изредка встречаются фрагменты пенополистирола в местах с редкими завалами водотока растительностью
11.	Участок водотока р. Лошица от ул. Кижеватова до спортивной площадки СШ № 62	Глубина водотока до 1 м. Уход за участком реки не осуществляется. На берегу сильный бурелом и подмывающая кустарниковая растительность. Русло со следами сильной водной эрозии, следы паводков. Имеется эрозионный разрез, выходящий со стороны стройплощадки комплекса «Минск-Мир»	На берегу на поверхности грунта встречаются единичные гранулы полистирола, а также на остатках сухой растительности после паводков (кустарники, пни). На участке с затором из кустарников и упавших деревьев обилие полистирола. Мор рыбы
12.	р. Лошица от спортивной площадки СШ № 62 до ДС № 354	Водоток ровный, берег обрывистый, отсутствует водная растительность	Единичные гранулы полистирола на берегу выше уреза воды, в том числе на растительности (возможно, после паводков)
13.	р. Лошица от ДС № 354 до Южной магистрали	Русло искусственно расширено. Построен новый коллектор под дорогой. Грунт сильно нарушен спецтехникой	Поверхность воды чистая, бытового и строительного мусора не обнаружено
14.	р. Лошица от ж/д путей около станции Лошица до пункта приема № 45 Минсккоопвторресурсы	Берега местами обрывистые. Явные признаки процессов меандрирования. Обилие пней и высохшего кустарника в воде	Полистирол замечен на растительности (в том числе старой, находящейся в воде) выше уреза воды на расстоянии около 1 м (закрепился в момент паводков). Встречается также в излучинах реки
15.	р. Лошица от пункта приема № 45 Минсккоопвторресурсы до ул. Маяковского	Затапливаемый и сильно заболоченный участок с неявным руслом. Обилие болотной растительности и макрофитов, имеются заторы и запруды из растительности	Единичные гранулы полистирола встречаются на берегу на поверхности грунта, а также на остатках сухой растительности после паводков (кустарники, пни). Полистирол обнаружен в местах затора из кустарников и упавших деревьев
16.	Пруд в районе Лошицкого парка	Зона рекреации. Левый берег пруда и берега острова убраны и приведены в порядок. Правый берег у моста сильно зарос кустарником. Один из выходов ливневой канализации	Полистирол встречается в виде как гранул, так и отдельных фрагментов, особенно на правом берегу водотока в высокой растительности
17.	р. Лошица от окончания Лошицкого парка до места впадения в р. Свислочь	Русло ровное, завалов и большого скопления бытового мусора не обнаружено. На берегу много намывного грунта и органических отложений (особенно в месте впадения в р. Свислочь)	Встречаются полистирольные гранулы по правому берегу на уровне уреза воды

Выполненные исследования показали, что прибрежные зоны руч. Мышка и р. Лошица по всей длине загрязнены полистиролом, который встречается на поверхности воды и почве, а также на водной и прибрежной растительности. Полистирол присутствует в виде фрагментов пенополистирольных плит и вспененных гранул полистирола. Судя по полученным данным, поступление полистирола в прибрежные зоны малых рек может осуществляться из разных источников, включая предприятие по производству пенополистирольных плит, сбросы ливневой канализации и поверхностный плоскостной смыв с водосбора. Встречающиеся в прибрежной зоне бытовые отходы (пластиковые и стеклянные бутылки, полиэтиленовые пакеты или их фрагменты, ветошь и др.) свидетельствуют о влиянии такого фактора, как любительская рыбалка или другие виды рекреации, связанные с посещением прибрежных зон.

Как и предполагалось, рассеяние полистирола с промышленной площадки предприятия по производству пенополистирольных плит не ограничивается прилегающим к промзоне участком поймы руч. Мышка. Загрязнение вспененными гранулами полистирола и фрагментами пенопласта обнаруживается выше и ниже по течению реки, куда поступает поверхностный сток с прилегающей промышленной и транспортной зон; не исключается перенос частиц полистирола ветром (рис. 3).

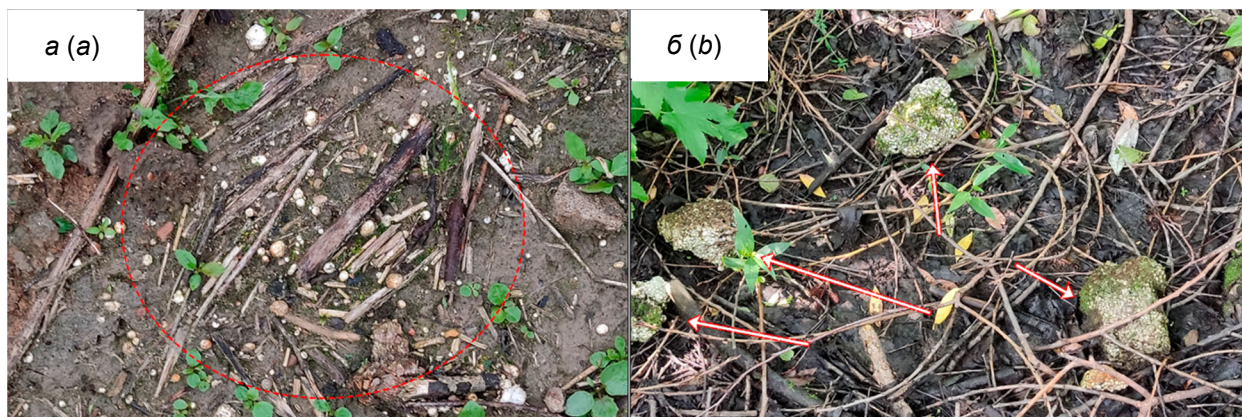


Рис. 3. Загрязнение полистиролом высохших участков Грушевского канала в районе коллектора, соединяющего его устье с руч. Мышка (а) и поймы руч. Мышка в районе автодрома по ул. Семашко (б)

Fig. 3. Polystyrene contamination of dried sections of the Grushevsky Canal in the area of the collector connecting its mouth with the Myshka Creek (a) and the floodplain of the Myshka creek near the autodrom on Semashko Street (b)

Наиболее высокий уровень загрязнения прибрежной зоны полистиролом характерен для участка поймы руч. Мышка в непосредственной близости от предприятия. Полистирол здесь представлен как фрагментами пенопласта, так и шариками полистирола размером от менее 2 мм до 4–5 мм. Местами обнаруживаются их скопления, практически полностью перекрывающие почву на площади до 1 м² (рис. 4). Это обусловлено близостью промплощадки, на которой повсеместно зафиксированы фрагменты готовых изделий (пенопласта), вспененные шарики и гранулы сырья, легко перемещающиеся с ветром и поверхностными водами [10]. В пойме частицы полистирола задерживаются растительностью, в том числе опавшей листвой, а в периоды паводков перекрываются наносным грунтом.



Рис 4. Скопление вспененных шариков полистирола и фрагментов пенопласта в пойме руч. Мышка между улицами Семашко и Софьи Ковалевской

Fig. 4. Accumulation of foamed polystyrene balls and foam fragments in the floodplain of the Myshka Creek between Semashko and Sofya Kovalevskaya Streets

На способность растительности, в частности макрофитов, задерживать на себе плотные скопления частиц микропластика, выполняя тем самым барьерные функции по отношению к данному типу загрязнения, указано в работах В. Д. Казмирука [14, 15]. В случае рассматриваемого участка поймы руч. Мышка растительность, представленная болотными видами (преимущественно тростником) и разнотравьем, служит механическим препятствием для перемещения полистирола. Однако при повышении уровня воды незагрязненные и не закрепленные почвой или растениями частицы полистирола всплывают на поверхность и мигрируют дальше. Местами происходит их очередной «перехват» растениями или другими барьерами, например, бетонными кольцами под дорогами или укреплениями на берегах. Зафиксированные частицы полистирола на различной высоте на растениях (0,5 м и более) на разных участках руч. Мышка и р. Лошица подтверждают такие процессы. Кроме того, полистирол при повышении уровня воды перемещается выше по склону прибрежной зоны, удаляясь от основного русла. Этим можно объяснить его наличие на расстоянии до 30 м от водотока. О том, что данный полистирол был привнесен с водотоком, свидетельствует наличие признаков подтопления и разливов реки в местах обнаружения гранул и фрагментов пенополистирола.

Следует также отметить, что частицы полистирола способны мигрировать вглубь почвенного профиля. Так, на данном участке полистирол замечен на глубине до 30 см, что может быть связано с характером формирования пойменных отложений и их пополнением привнесенными с ливневыми или паводковыми водами минеральными частицами.

Отдельного внимания заслуживает каскад технологических прудов, принимающих ливневой сток коллекторов № 8 «Запад» и «Юго-Запад», созданных перед впадением руч. Мышки в р. Лошица. На поверхности прудов, а также на их берегах образуются значительные скопления частиц полистирола (рис. 5). Важно отметить, что помимо вспененных шариков полистирола диагностируются гранулы сырья размером 1–2 мм. Это еще одно доказательство важности такого источника полистирола, как промышленное предприятие, где используются первичные полимеры для вспенивания и производства пенопласта. Вместе с тем привнос полистирола с ливневыми водами не исключается, тем более что указанные коллекторы дренируют значительную часть города. Накопление в прудах частиц полистирола, связанное с наличием искусственных преград, означает снижение их количества к дальнейшей миграции вниз по течению. Периодически коммунальные службы проводят полную очистку сооружений, удаляя воду с загрязнителем и вычищая отложения с помощью спецтехники. При очистке прудов значительная часть накопленных осадков с различными примесями, включая полистирол, удаляется на полигоны.



Рис. 5. Загрязнение полистиролом очистных сооружений в районе ул. Семашко:
а – загрязнение прибрежной зоны; б – образование полистирольных пятен на поверхности воды

Fig. 5. Polystyrene pollution of sewage treatment plants in the area of Semashko Street:
a – pollution of the coastal zone; b – formation of polystyrene stains on the water surface

На возможность попадания частиц полистирола в пойму с неорганизованным поверхностным стоком указывают результаты исследования участка р. Лошица в районе строительства нового экспериментального многофункционального комплекса «Минск-Мир», который примыкает к реке с севера. Следы водной эрозии с территории стройки подтверждают такую возможность. Как известно, пенополистирол активно используется в строительстве в качестве утеплителя. Поскольку он легко

ломается и крошится, то неизбежно дальнейшее перемещение его частиц и фрагментов с различными потоками. Выявленное обилие частиц полистирола и фрагментов пенопласта в прибрежной зоне р. Лошица от ул. Кижеватова до Южной магистрали обусловлено также наличием завалов и буреломов на водотоке, которые являются барьером на пути их миграции. Следует отметить, что такие завалы имеются и при впадении канала Грушевский в руч. Мышка, на участках р. Лошица в районе ул. Кижеватова, а также от ул. Брестской до ул. Зубачева. Во всех случаях при наличии естественных преград из деревьев, кустарниковой и травянистой растительности на водотоках явно увеличивается количество полистирола.

В целом на данном этапе исследований результаты не позволяют получить количественную оценку уровня загрязнения прибрежных зон руч. Мышка и р. Лошица полистиролом. Однако необходимо подчеркнуть зафиксированные случаи мора рыбы, которые приурочены к наиболее выраженному загрязнению участков рек. Так, мертвая рыба была обнаружена у уреза воды и на побережье в районе очистных сооружений на ул. Семашко, в районе ул. Кижеватова и на участке от ул. Брестской до ул. Зубачева. Несмотря на возможные разные источники поступления полистирола, доминирующая форма на всем протяжении маршрута – вспененные шарики полистирола размером менее 5 мм. В дополнение к ним во многих случаях обнаруживаются гранулы полимерного сырья размером до 2 мм. И те, и другие частицы являются микропластиком, которые могут заглатываться рыбой и птицами. Негативное воздействие частиц полистирола на почвенную биоту показано в работах [16, 17]. Согласно [18], опасность загрязнения почв микропластиком связана не только с его прямым неблагоприятным воздействием на почвенных животных и почвенных микробов, но и с формированием синергетического загрязнения с другими веществами, такими как тяжелые металлы.

Как и при других видах загрязнений отходами, загрязнение прибрежных зон полистиролом ухудшает эстетические свойства ландшафтов, снижает их привлекательность и ценность для рекреации. Между тем, опыт организации зон отдыха возле водохранилища Лошица и пруда в Лошицком парке свидетельствует о высоком потенциале данных аквальных систем и необходимости проведения природоохранных мероприятий по сбору отходов и ликвидации завалов на водотоках.

Закключение. Исследование прибрежных зон малых рек юго-западной части г. Минска показало, что полистирол в виде фрагментов пенопласта, вспененных шариков и гранул сырья встречается практически по всей длине маршрута: от ул. Семашко до устья р. Лошица. Это означает, что загрязнение может распространяться и дальше по р. Свислочь.

Среди источников поступления полистирола выделяются предприятие по производству пенополистирольных плит и ливневой сток из дождевых коллекторов, которые дополняются неорганизованным поверхностным стоком и бытовыми источниками. Наиболее загрязненными участками являются пойма в средней части руч. Мышка вблизи предприятия по производству пенополистирольных плит и район технологических прудов в юго-западной части г. Минска.

Следует отметить, что руч. Мышка и р. Лошица дренируют значительную часть южной и юго-западной части г. Минска, где расположено множество строящихся объектов. При использовании пенополистирола в качестве утеплителя возможно его попадание в окружающую среду и вынос за пределы стройплощадок. Не исключено влияние других промышленных предприятий, где производится или используется пенополистирол.

Необходимо проведение дальнейших исследований с целью поиска и локализации мест поступления пенополистирола в прибрежные зоны. Для оценки опасности загрязнения почв и донных отложений планируются работы по определению частиц микропластика в лабораторных условиях.

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. Geyer, R. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law // Science Advances. – 2017. – Vol. 3, № 7. – P. e1700782.
3. Carpenter, E. J. Plastics on the Sargasso Sea surface / E. J. Carpenter, K. L. Smith // Science. – 1972. – Vol. 175, № 4027. – P. 1240–1241.
4. Polystyrene spherules in coastal waters / E. J. Carpenter [et al.] // Science. – 1972. – Vol. 178, № 4062. – P. 749–750.
5. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and Yellow Sea / Q. Zhou [et al.] // Geoderma. – 2018. – P. 201–208. – Vol. 322. doi:10.1016/j.geoderma.2018.02.015
6. A catchment-scale perspective of plastic pollution / F. M. Windsor [et al.] // Global Change Biology. – 2019. – Vol. 25. – P. 1207–1221. doi:10.1111/gcb.14572
7. Identification and quantification of macro-and microplastics on an agricultural farmland / S. Piehl [et al.] // Sci. Rep. – 2018. – Vol. 8. – P. 1–9. doi:10.1038/s41598-018-36172-y

8. Wetland soil microplastics are negatively related to vegetation cover and stem density / R. Helcoski [et al]. // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 256. – P. 113391.
9. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 15.12.2023.
10. Кухарчик, Т. И. Загрязнение почв микропластиком при производстве пенополистирола / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк // *Почвоведение*. – 2022. – № 3. – С. 370–380.
11. Состояние компонентов природной среды в пределах экологического коридора II порядка (долины р. Мышки, г. Минск) / Е. В. Санец [и др.] // *Природопользование*. – 2021. – № 1. – С. 73–92.
12. Макаревич, А. А. Антропогенные гидрологические преобразования рек г. Минска / А. А. Макаревич // *Вестник БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. – 2001. – № 1. – С. 62–67.
13. Государственный водный кадастр – информационная аналитическая система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://195.50.7.216:8081/#services>. – Дата доступа: 05.04.2024.
14. Казмирук, В. Д. Барьерная роль макрофитов при загрязнении водных объектов микропластиком / В. Д. Казмирук // *Наука. Инновации. Технологии*. – 2021. – № 3. – С. 133–149.
15. Казмирук, В. Д. Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов / В. Д. Казмирук // *Геосистемы переходных зон*. – 2021. – Т. 5, № 4. – С. 378–388.
16. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil / D. Cao [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 61, № 1. – P. 012148.
17. Toxicological effects of polystyrene microplastics on earthworm (*Eisenia fetida*) / X. Jiang [et al.] // *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*. – 2020. – Vol. 259. – P. 113896.
18. Rillig, M. C., Microplastic incorporation into soil in agroecosystems / M. C. Rillig, R. Ingraffia, A. A. De Souza Machado // *Frontiers in Plant Science*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1805.

References

1. Bank M. S. *Microplastic in the Environment: Pattern and Process*. 1st ed. Cham. Springer International Publ., 2022, 354 p.
2. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017, vol. 3, no. 7, p. e1700782.
3. Carpenter E. J., Smith K. L. Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science*, 1972, vol. 175, no. 4027, pp. 1240–1241.
4. 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.
5. Zhou Q., Zhang H., Fu C., Zhou Y., Dai Z., Li Y., Tu C., Luo Y. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma*, 2018, vol. 322, pp. 201–208. doi:10.1016/j.geoderma.2018.02.015
6. Windsor F. M., Durance I., Horton A. A., Thompson R. C., Tyler C. R., Ormerod S. J. A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Global Change Biology*, 2019, vol. 25, pp. 1207–1221. doi:10.1111/gcb.14572
7. Piehl S., Leibner A., Löder M. G. J., Dris R., Bogner C., Laforsch C. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–9. doi:10.1038/s41598-018-36172-y
8. Helcoski R., Yonkos L. T., Sanchez A., A. H. Baldwin A. H. Wetland soil microplastics are negatively related to vegetation cover and stem density. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 256, pp. 113391.
9. *Natsional'nyy statisticheskiy komitet RB Interaktivnaya informatsionno-analiticheskaya sistema rasprostraneniya ofitsial'noy statisticheskoy informatsii* [National Statistical Committee of the Republic of Belarus Interactive information and analytical system for disseminating official statistical information] Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/> (accessed 15 December 2023). (in Russian)
10. Kukharchik T. I., Chernyuk V. D. *Zagryazneniye Pochv Mikroplastikom Pri Proizvodstve Penopolistirola* [Soil Pollution with Microplastics During Expanded Polystyrene Production]. *Pochvovedeniye = Eurasian Soil Science*, 2022, no. 3, pp. 370–380. (in Russian)
11. Sanets E., Aucharova A., Kravchuk L., Savchenko S., Bokaya H. *Sostoyaniye komponentov prirodnoy sredy v predelakh ekologicheskogo koridora II poryadka (doliny r. Myshki, G. Minsk)* [State of natural environmental components within the ecological corridor of the order II (The Myshka river valley, Minsk)]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 73–92. (in Russian)
12. Makarevich A. A. *Antropogennyye gidrologicheskiye preobrazovaniya rek g. Minska* [Anthropogenic hydrological transformations of rivers in Minsk]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*, 2001, vol. 1, no. 2, pp. 62–67. (in Russian)
13. *TSNIIVR. Gosudarstvennyy Vodnyy Kadastr – informatsionnaya analiticheskaya sistema* [CRICUWR. State Water Cadastre – Information analytical system]. Available at: <http://195.50.7.216:8081/#services> (accessed 5 April 2024). (in Russian)
14. Kazmiruk V. D. *Bar'yernaya rol' makrofitov pri zagryaznenii vodnykh ob'ektov mikroplastikom* [The barrier role of macrophytes in the pollution of water bodies with microplastics]. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. = The science. Innovation. Technologies*, 2021, no. 3, pp. 133–149. (in Russian)
15. Kazmiruk V. D. *Mekhanizmy perekhvata plastikovykh mikrochastich bufernymi zonami iz makrofitov* [Mechanisms of plastic microparticles retention by buffer zones with macrophytes]. *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 378–388. (in Russian)

16. Cao D., Wang X., Luo X., Liu G., Zheng H. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 61, no. 1, p. 012148.
17. Jiang X., Chang Y., Zhang T., Qiao Y., Klobučar G., Li M. Toxicological effects of polystyrene microplastics on earthworm (*Eisenia fetida*). *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987), 2020, vol. 259, p. 113896.
18. Rillig M. C., Ingraffia R., De Souza Machado A. A. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, p. 1805.

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

Чернюк Владимир Дмитриевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

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

Vladimir D. Chernyuk – 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: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

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: nestasssia@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-78-87>
УДК 631.445.52

Поступила в редакцию 24.05.2024
Received 24.05.2024

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХЛОРИДАМИ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ СКЛАДИРОВАНИЯ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ

А. А. Хрипович, Е. А. Тишковская

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены основные факторы воздействия складирования галитовых отходов на качество подземных вод, а также засоленность почвы в техногенно нарушенных экосистемах. Показано, что засоление подземных вод наиболее интенсивно в непосредственной близости от мест складирования галитовых отходов, и с течением времени содержание хлоридов нарастает. Основным фактором, определяющим распространение засоления, является направление потока на север и восток к рекам Сивельга и Случь. Установлено снижение содержания хлорид-ионов в почве при удалении от террикона и в почвенном горизонте, однако даже на расстоянии 300 м оно остается достаточно высоким, что позволяет отнести почву к высокой степени засоления. В модельных опытах показано положительное влияние внесения торфа различной степени разложения на кислотность почвы и уменьшение содержания хлоридов на 27–37 %. Среди протестированных сельскохозяйственных культур наибольшей толерантностью к содержанию хлоридов в почве обладали свекла, ячмень и мятлик.

Ключевые слова: галитовые отходы; солеотвал; засоленная почва; содержание хлорид-ионов; растения-галофиты; толерантность к хлоридам.

Для цитирования. Хрипович А. А., Тишковская Е. А. Геоэкологические факторы загрязнения почвы и подземных вод хлоридами в зоне воздействия объектов складирования галитовых отходов // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 78–87.

GEOECOLOGICAL FACTORS OF SOIL AND GROUNDWATER CONTAMINATION WITH CHLORIDES IN THE ZONE OF IMPACT OF HALITE WASTE STORAGE FACILITIES

A. A. Khripovich, E. A. Tishkovskaya

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The main factors of halite waste storage impact on groundwater quality and soil salinity in technogenically disturbed ecosystems are considered. It is shown that groundwater salinisation is most intensive in the immediate vicinity of halite waste storage sites, but the chloride content increases with time. The main factor determining the spread of salinisation is the flow direction to the north and east to the Sivelga and Sluch rivers. The content of chloride ions in the soil was found to decrease with distance from the heap and in the soil horizon, but even at a distance of 300 m it remains high enough, which allows us to attribute the soil to a high degree of salinisation. In model experiments the positive effect of peat application of different degree of decomposition on soil acidity and reduction of chloride content by 27–37 % was shown. Among tested agricultural crops the greatest tolerance to chloride content in soil was possessed by beetroot, barley and bluegrass.

Keywords: halite waste; salt dump; saline soil; chloride ion content; halophyte plants; chloride tolerance.

For citation. Khripovich A. A., Tishkovskaya E. A. Geoecological factors of soil and groundwater contamination with chlorides in the zone of impact of halite waste storage facilities. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 78–87.

Введение. Производство калийных удобрений флотационным и галургическим методами на ОАО «Беларуськалий» сопровождается образованием твердых галитовых отходов, содержащих более 90 % хлоридов натрия, калия, магния и кальция, а также жидких галитовых и глинисто-солевых шламов. Ежегодно на четырех рудоуправлениях (РУ) предприятия образуется 16–20 млн т галитовых отходов и 1,5–2,0 млн т глинисто-солевых шламов, которые складываются на более чем 2,0 тыс. га

земель, изъятых их сельскохозяйственного производства. Общий объем отходов, находящихся в солеотвалах и шламохранилищах, оценивается в более чем 1 млрд т [1].

Складирование галитовых отходов производится на солеотвале с применением технологии высотного складирования с максимальной высотой террикона до 120 м. В процессе транспортировки и складирования отходов эмиссия хлоридов в атмосферу незначительна, так как влажность отходов составляет 8–12 % и их структура препятствует пылению. Поступление хлоридов натрия, калия, магния и кальция из террикона в окружающую среду происходит вследствие растворения атмосферными осадками и ветровой эрозии с поверхности террикона. В этом случае увеличение высоты террикона, с одной стороны, позволяет складировать на единице площади солеотвала большее количество отходов, а с другой – увеличивается радиус воздействия на территорию. Одним из перспективных направлений минимизации воздействия солеотвалов на окружающую среду является складирование галитовых отходов методом гидронамыва. Галитовые отходы смешиваются с рассолом и самооттеком поступают на откос солеотвала [2]. Транспортировка отходов гидравлическим способом не только исключает пыление, но и приводит к образованию плотной коркообразной структуры на поверхности склона террикона за счет процессов дегидратации и образования кристаллизационных связей между хлоридами натрия и глинистой частью нерастворимого остатка. Образовавшаяся плотная корка менее подвержена разрушению и размыву атмосферными осадками с течением времени, что существенно уменьшает вероятность обрушения части склона солеотвала и попадания соли в воздух [2–4]. Поступление солей в атмосферу при складировании таким способом оценивается в 6 т/год, что составляет 0,4 % от общего количества выбросов загрязняющих веществ [3]. Для предотвращения попадания солей в поверхностные и подземные воды солеотвалы и шламохранилища оборудованы системой ограждающих дамб, отводных канав, противофильтрационных экранов и откачки рассолов насосными станциями. При стабильной безаварийной работе диффузия рассолов незначительна, однако возможность инфильтрации рассолов сохраняется.

Если засоление подземных вод в зоне воздействия ОАО «Беларуськалий» изучено достаточно, то сведения о распространении засоления почвы противоречивы. Ряд авторов приводит данные о незначительном увеличении содержания солей в почве [4], в других источниках [5] почвы даже на расстоянии более 500 м от мест складирования галитовых отходов признают с повышенной засоленностью. В этой связи представлялось интересным проследить не только изменение степени засоленности подземных вод во времени, что является важным при увеличении площади солеотвалов с ростом добычи калийной соли, но и исследовать засоленные почвы в зоне воздействия предприятия, а также возможность корректировки их кислотности и содержания хлоридов путем внесения природного каустобиолита – торфа.

Негативное воздействие избытка натрия и хлоридов начинает проявляться уже на ранних этапах развития растений – в период набухания и прорастания семян. Вследствие влияния этих ионов на осмотические процессы в растительных клетках снижается скорость поглощения ими воды, в результате чего растения испытывают стресс. За счет изменения физиологических процессов увеличивается период появления всходов, тормозятся рост и развитие растений в целом, но не равномерно в процессе вегетации. В условиях хлоридного засоления в начале жизнедеятельности рост и развитие растений замедляются и ускоряются во второй половине вегетационного периода [6]. Ряд авторов отмечает большую чувствительность корневой системы растений, чем надземной части к засоленности почвы. При этом установлено не только уменьшение длины корней, но и их деформация и нарушение структуры [6, 7]. Присутствие в почве галитов ингибирует биосинтез ферментов и витаминов в листьях растений, что приводит к угнетению роста и даже гибели растений при концентрации солей в почве 0,4–0,5 г/кг. Высокое содержание солей приводит к нарушению агрофизических свойств почвы, и в первую очередь к ее уплотнению, при уровне загрязнения хлоридами 0,4–0,5 г/кг образуется плотная корка с признаками кристаллизации соли [6]. В присутствии галитов нарушаются деятельность почвенных микроорганизмов и ферментативная активность почвы. При концентрации хлоридов 1,0 г/кг воздухообмен в почве снижается в 2,2 раза, а ее каталазная активность – в 4,0 раза [8].

Для рекультивации засоленных земель используют растения-галофиты, обладающие повышенной устойчивостью к присутствию солей в почве. Среди сельскохозяйственных культур также есть ряд растений, способных успешно произрастать на засоленных почвах. Наименее чувствительны к хлоридам ячмень, кукуруза и сорго из зерновых культур, а также подсолнечник и свекла – из технических культур [6]. Среди компонентов луговых фитоценозов устойчивостью к засолению почвы отличаются вейник наземный и ежа сборная [8], среди сорных видов галофитов преобладают бескильница расставленная, латук татарский, лебеда развесистая, лебеда лоснящаяся [3].

Цель работы – исследовать изменения засоления подземных вод по данным локального мониторинга и влияние торфа на содержание хлорид-ионов в засоленной почве.

Материалы и методы исследований. Для оценки воздействия солеотвалов и шламохранилищ ОАО «Беларуськалий» в работе были использованы данные локального мониторинга подземных вод [9], выполненные предприятием в период 1986–2020 гг., а также о составе подземных вод в водозаборных скважинах, находящихся в непосредственной близости от мест складирования галитовых отходов.

Результаты локального мониторинга свидетельствуют о высоком уровне концентраций хлорид-иона, сульфат-иона и минерализации воды в местах расположения всех четырех РУ солеотвалов и шламохранилищ ОАО «Беларуськалий». Средние значения концентраций по РУ в наблюдательных скважинах четырех РУ за период 2018–2021 гг. приведены в табл. 1.

Таблица 1. Среднее значение фактических концентрации загрязняющих веществ за период 2018–2021 гг. [9]

Table 1. Mean value of actual pollutant concentrations for the period 2018–2021 [9]

Год проведения наблюдений	Номер рудоуправления	Среднее значение фактических концентраций загрязняющих веществ в наблюдательных скважинах, мг/дм ³		
		Минерализация воды	Хлорид-ион	Сульфат-ион
2018	РУ № 1	16 352,6	9996,5	75,1
	РУ № 2	62 996,7	36 487,6	356,1
	РУ № 3	15 167,4	8515,4	73,3
	РУ № 4	18 494,8	10 137,2	157,2
2019	РУ № 1	16 403,3	9657,7	72,8
	РУ № 2	63 388,6	33 740,9	342,1
	РУ № 3	15 632,5	8771,4	76,4
	РУ № 4	20 104,8	11 150,9	155,7
2020	РУ № 1	15 241,9	8896,7	87,9
	РУ № 2	67 647,7	32 429,6	308,5
	РУ № 3	14 135,2	8208,2	60,3
	РУ № 4	17 556,4	10 039,5	166,1
2021	РУ № 1	15 520,3	9312,0	63,3
	РУ № 2	56 681,0	32 530	366,9
	РУ № 3	13 579,0	8185,2	62,4
	РУ № 4	17 845,1	9877,0	210,2

Наиболее высокое содержание загрязняющих веществ отмечалось, как и ранее, в скважинах РУ № 2. Максимальные значения соотношения $C_{\text{набл}}/C_{\text{фон}}$ составляли: 18 236,96 – по хлорид-иону при концентрации 49 239,80 мг/дм³; 1022,08 – по минерализации воды при концентрации 245 300 мг/дм³; 392,24 – по сульфат-иону при концентрации 1290,46 мг/дм³ [9].

Качество воды, определяемое ее химическим составом, является основным критерием для выбора направления ее использования в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. Особенно актуальны изучение и прогноз изменения качества подземных вод разных водоносных комплексов и горизонтов зоны активного водообмена на исследуемой нами территории – вблизи мест складирования отходов калийного производства. Условия формирования подземных вод, их химический состав и величина минерализации тесно связаны с геологическим строением, литологическими особенностями водо-вмещающих пород, степенью гидравлической связи подземных вод различных водоносных комплексов и горизонтов между собой и с поверхностными водами. Также загрязнение подземных вод связано с техногенными факторами – сельскохозяйственной деятельностью, близостью с шламохранилищами и солеотвалами, и другими факторами. Весьма сложной является гидрогеохимическая обстановка на территории, непосредственно примыкающей к шламохранилищам и солеотвалам ОАО «Беларуськалий». Зона активного водообмена в пределах рассматриваемой территории распространяется на глубину 120–130 м и включает водоносные и слабоводоносные горизонты и комплексы четвертичных, неогеновых, палеогеновых и верхнемеловых отложений. Качественная характеристика подземных вод выполнена по результатам химических анализов проб, отобранных из наблюдательных скважин локальной мониторинговой сети, организованной ОАО «Беларуськалий» в 1989–1991 гг. и существующей по настоящее время, и из скважин водозаборов № 2 и 3 [3]. На территории исследований режимная сеть состоит из пунктов локальной мониторинговой сети (гидрогеологических кустов), пробуренных на разные водоносные комплексы и горизонты. На данной территории оборудованы мониторинговые скважины на водоносный днепровский сожский водно-ледниковый комплекс, водоносный березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс, водоносный березинский подморен-

ный водно-ледниковый комплекс, слабоводоносный неогеновый (антопольский) терригенный комплекс, водоносный бриневский терригенный комплекс, слабоводоносный (локально водоносный) киевский и харьковский терригенный комплекс, водоносный сеноманский карбонатно-терригенный горизонт. Местоположение пунктов наблюдательной мониторинговой сети, выбранных для анализа в нашем исследовании, представлено на рис. 1.



Рис. 1. Местоположение скважин подземных вод на местности

Fig. 1. Location of groundwater wells on the ground

Качественный состав воды из водозаборных скважин № 2 и 3, которые находились наиболее близко к зоне складирования галитовых отходов, соответствовал нормативам для питьевой воды (СанПиН 10-124 РБ 99) и в данной работе не рассматривался.

Для изучения изменения содержания хлоридов в засоленных почвах и в присутствии торфа различной степени разложения были отобраны пробы почвы вблизи солеотвала РУ № 2. Определение массовой концентрации хлорид-ионов в водных вытяжках проводилось потенциометрическим методом с использованием ион-селективного электрода. Для определения толерантности растений к засоленности почвы производили посев семян и учет всхожести по отношению к контролю (универсальный грунт ГОСТ 12071-2014), через 15 дней определяли биометрические показатели в среднем на одно растение: длину корней и длину надземной части.

Результаты и их обсуждение. Проанализировав качество подземных вод по минерализации и хлоридам каждого опробованного водоносного комплекса по скважинам относительно расположения солеотвалов, в первую очередь РУ № 2 как наиболее проблемного с точки зрения содержания хлорид-ионов, были выбраны наиболее характерные по степени засоления и динамики ее изменения во времени скважины, для которых были построены графики изменения содержания хлорид-ионов, приведенные на рис. 2–5. Предельно допустимая концентрация (ПДК) хлоридов в питьевой воде составляет 350 мг/л (согласно СанПиН 10-124 РБ 99).

Данные по скважине № 13, находящейся на границе солеотвала в южном направлении, позволяют отнести подземные воды всех водоносных уровней к категории рассолов. Отмечается динамика засоления с увеличением содержания хлоридов до 150–300 г/л с аномальным понижением в 2009 г. (рис. 2).

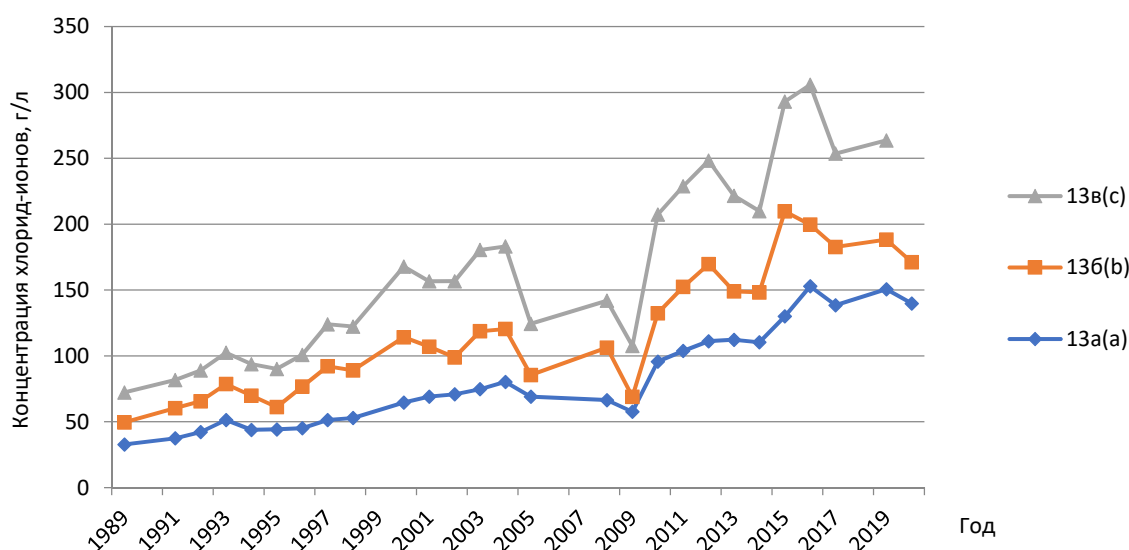


Рис. 2. Динамика концентрации хлорид-ионов в подземных водах скважины № 13:
 13а – березинский днепровский водно-ледниковый комплекс; 13б – днепровский сожский водно-ледниковый комплекс; 13в – сеноманский карбонатно-терригенный горизонт

Fig. 2. Dynamics of chloride ion concentration in groundwater of well № 13:
 13a – Berezinsky Dneprovsky water-glacial complex; 13b – Dneprovsky Sozhsky water-glacial complex;
 13c – Cenomanian carbonate-terrigenous horizon

Скважины № 18, 25 и 72 находятся в северной и северо-восточной части на удалении от террикона, данные изменения содержания хлорид-ионов представлены на рис. 3–5. В период наблюдений в первое десятилетие содержание хлоридов не превышало норму, однако начиная с 2000 г. (скважина № 25а, 25б, 25в) и 2009 г. (скважина № 18) количество хлорид-ионов превысило ПДК в 200–500 раз (№ 25) и 115–160 раз (№ 18).

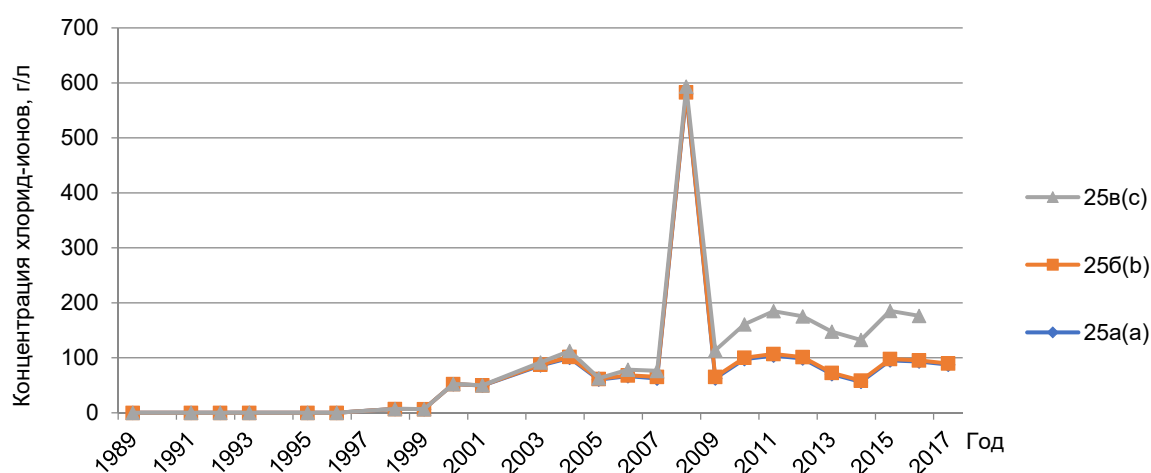


Рис. 3. Динамика концентрации хлорид-ионов в подземных водах скважины № 25:
 25а – бриневский терригенный комплекс; 25б – днепровский сожский водно-ледниковый комплекс;
 25в – киевский и харьковский терригенный комплекс

Fig. 3. Chloride-ion content in groundwater of well № 25:
 25a – Brinevsky terrigenous complex; 25b – Dnieper Sozh water-glacial complex;
 25c – Kiev and Kharkov terrigenous complex

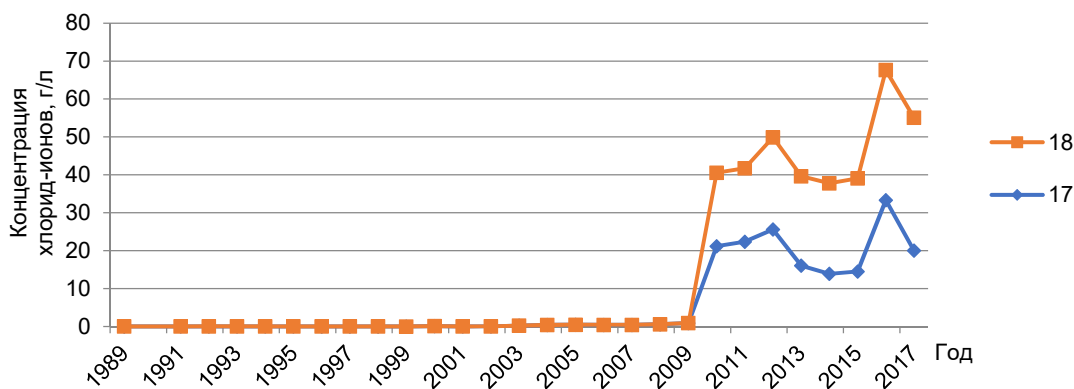


Рис. 4. Динамика концентрации хлорид-ионов в подземных водах скважин № 17 и 18 (бриневский терригенный комплекс)

Fig. 4. Dynamics of chloride ion concentration in groundwater of wells № 17 and 18 (Brinevsky terrigenous complex)

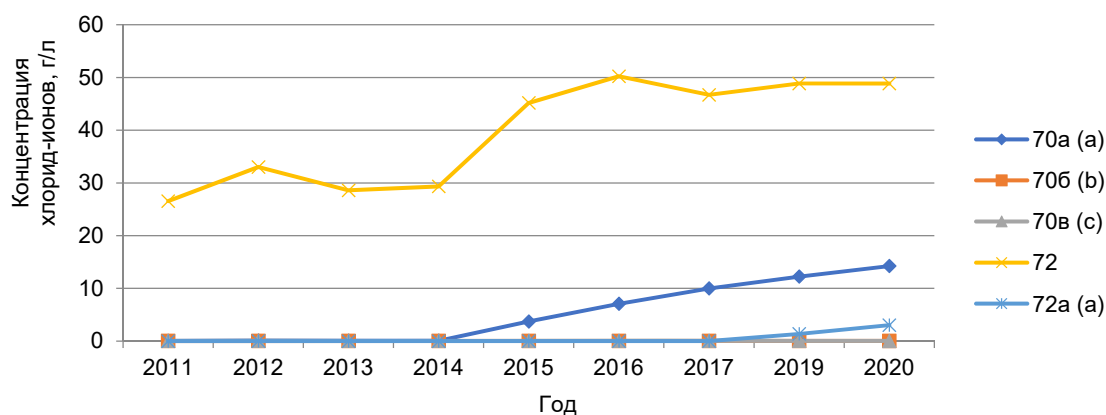


Рис. 5. Динамика концентрации хлорид-ионов в подземных водах скважин № 70, 72: 70а – киевский и харьковский терригенный комплекс; 70б – бриневский терригенный комплекс; 70в–72а – бриневский терригенный комплекс; 72б – киевский и харьковский терригенный комплекс

Fig. 5. Dynamics of chloride ion concentration in groundwater of wells № 70, 72: 70a – Kyiv and Kharkiv terrigenous complex; 70b – Brinevsky terrigenous complex; 70c–72a – Brinevsky terrigenous complex; 72b – Kyiv and Kharkiv terrigenous complex

Скважина № 72 заложена в 2011 г. и наиболее удалена от террикона, поэтому данные по содержанию хлоридов в этих подземных водах представляют особый интерес с точки зрения динамики засоления (рис. 5). Тем не менее уже с начала наблюдений уровень засоления воды в ней оказался высоким и составил 27–50 г/л хлоридов за период наблюдений.

Состояние подземных вод в северо-западной части от террикона представлено на рис. 5, на распространение засоления в этом направлении наибольшее влияние оказывает движение потока подземных вод в сторону рек Случь и Сивельга. В начальный период наблюдений содержание хлоридов не превышало норму, а начиная с 2015 г. составило 2–14 г/л, или 5–40 ПДК, что позволяет прогнозировать увеличение темпов засоления в ближайшие десятилетия и попадание в зону засоления ближайшего населенного пункта – деревни Брянчицы.

Наименьшими показателями по хлорид-иону отличалось состояние подземных вод в скважине № 63 (рис. 6). В начальном периоде наблюдений содержание хлоридов соответствовало нормативу во всех уровнях, это состояние сохраняется для вод березинско-днепровского и бриневского комплексов до настоящего времени, воды днепровско-сожского комплекса начиная с 2015 г. содержат 2–14 г/л хлорид-ионов, что соответствует 5–40 ПДК.

На южном направлении (скважина №17) также имеется тенденция к засолению подземных вод в последнее время. Как следует из рис. 4, в период до 2010 г. состояние вод по содержанию хлоридов соответствует норме, то за период 2011–2020 гг. количество хлоридов увеличилось до 21–32 г/л.

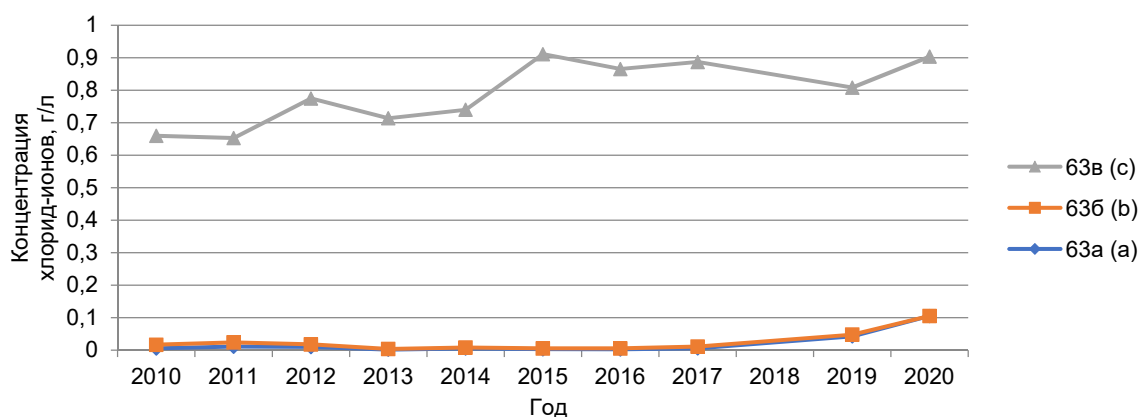


Рис. 6. Динамика концентрации хлорид-ионов в подземных водах скважины № 63:
 63а – бриневский терригенный комплекс; 63б – березинский днепровский водно-ледниковый комплекс;
 63в – днепровский сожский водно-ледниковый комплекс

Fig. 6. Dynamics of chloride ion concentration in groundwater of well № 63:
 63a – Brinevsky terrigenous complex; 63b – Berezinsky Dneprovsky water-glacial complex;
 63c – Dneprovsky Sozhsky water-glacial complex

По результатам анализа изменения загрязнения подземных вод в зоне воздействия складирования галитовых отходов нами были отобраны пробы почвы вблизи террикона РУ № 2 в районе скважин № 18 и 25, а также с учетом преимущественного направления ветровых потоков для данной местности [10]. Образцы отбирали с шагом 100 м (пробы 1, 2, 3) от террикона с таким расчетом, чтобы последняя проба почвы относилась уже к пахотным угодьям. На расстоянии 200 м были отобраны образцы почвы по глубине 0–15 см (проба 2.1), 15–30 см (проба 2.2), 30–45 см (проба 2.3), 45–60 см (проба 2.4).

На рис. 7 приведены результаты определения содержания хлоридов в отобранных пробах засоленной почвы и в этих пробах в присутствии торфа. Содержание хлоридов уменьшается при удалении от террикона, однако даже на расстоянии 300 м остается критически высокой 0,4 г/кг. Для изучения изменения содержания солей в присутствии торфа были проведены модельные опыты с образцами засоленной почвы, осоковым торфом низинного типа и пушицево-сфагновым торфом верхового типа. Внесение торфа различного генезиса и степени разложения в соотношении почва : торф 30 : 1 положительно сказывалось на агрохимических свойствах почвы. Результаты модельных опытов, приведенные на рис. 7 и 8, свидетельствуют о снижении концентрации хлорид-ионов в присутствии торфа на 27–37 %. При этом более значительное уменьшение содержания хлорид-ионов наблюдалось при добавлении к почве осокового торфа низинного типа.

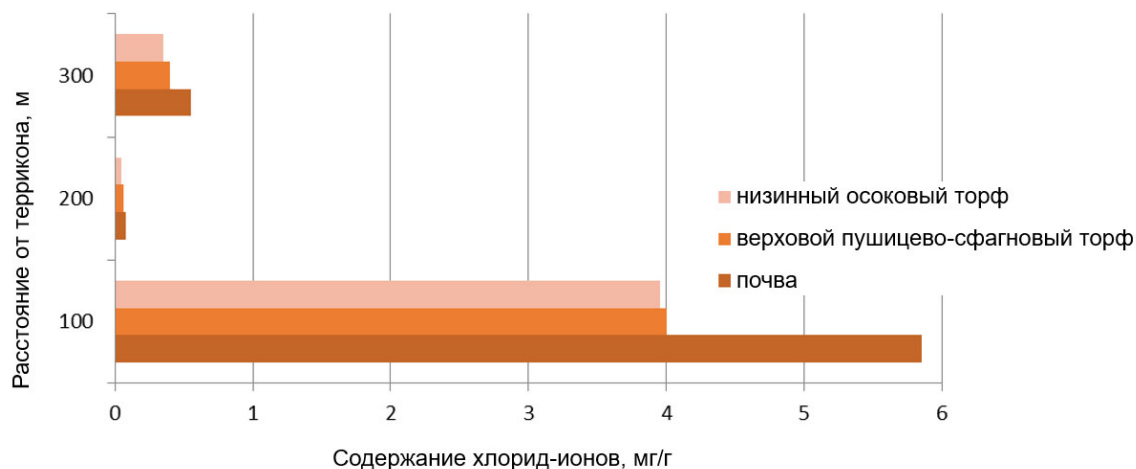


Рис. 7. Изменение содержания хлорид-ионов в засоленной почве при удалении от террикона

Fig. 7. Effect of peat on chloride ion content in saline soil at a distance from the heap

Результаты модельных опытов с использованием торфа (рис. 8) показали положительную динамику уменьшения миграции катионов до 10–20 % по почвенному горизонту, при этом отмечалось изменение кислотности почвы с pH 8,1–9,0 до pH 6,5–7,5, что положительно сказывается на произрастании растений.

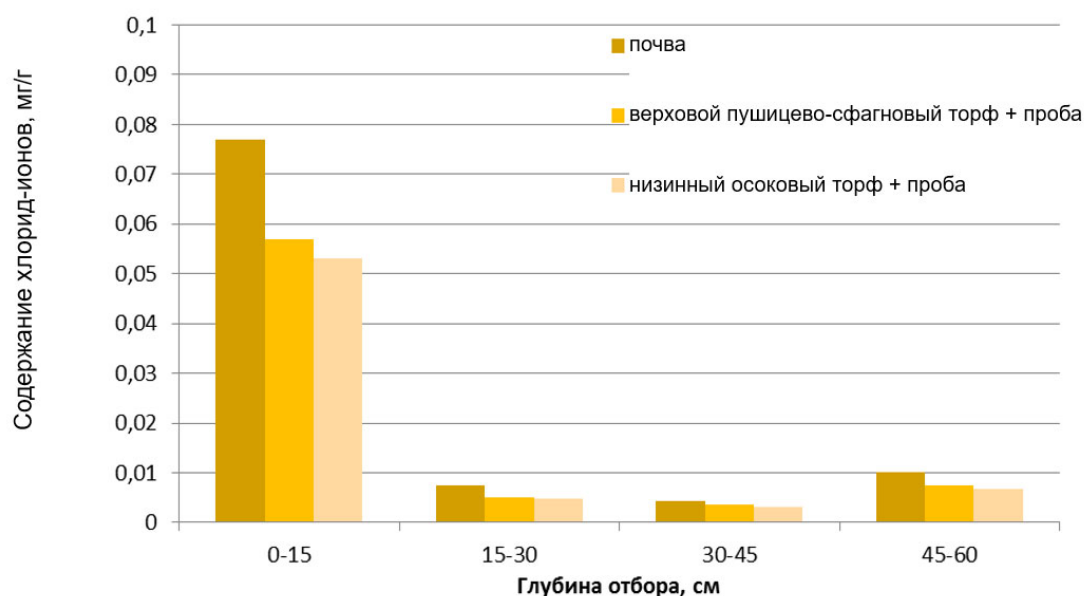


Рис. 8. Изменение содержания хлорид-ионов в засоленной почве по глубине почвенного горизонта

Fig. 8. Effect of peat on chloride ion content in saline soil by soil horizon depth

Для эксперимента по подбору культур для биологического этапа рекультивации засоленных земель и предпочтительного возделывания сельскохозяйственных культур на почвах, испытывающих воздействие галитовых отходов, были выбраны ячмень (зерновая культура), свекла (техническая культура), мятлик (компонент лугового травостоя) и распространенный медонос и сидерат – фацелия.

Результаты исследований всхожести и морфометрических показателей различных культур приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние засоленности почвы на всхожесть и морфометрические показатели растений

Table 2. Effect of soil salinity on germination and morphometric indices of plants

Культура	Содержание хлоридов в почве, мг/кг								
	5,85			0,55			0,10		
	Всхо- жесть, % к кон- тролю	Длина корней, см	Длина над- земной части, см	Всхо- жесть, % к кон- тролю	Длина корней, см	Длина над- земной части, см	Всхо- жесть, % к кон- тролю	Длина корней, см	Длина над- земной части, см
Мятлик	76,9	2,8	4,6	80,7	3,5	5,8	80,7	5,1	6,2
Фацелия	71,5	2,6	4,0	78,2	3,1	4,4	75,0	4,7	5,0
Ячмень	75,0	2,7	4,2	79,0	3,7	6,4	89,3	5,7	6,8
Свекла	80,0	2,7	3,7	87,6	3,5	4,1	92,1	4,3	4,5
<i>НСП_{0,5}</i>	3,1	0,5	0,8	2,9	0,7	0,6	3,2	0,7	0,8

Как следует из данных табл. 2, всхожесть семян и морфометрические показатели растений находятся в прямой зависимости от степени засоления почвы. Наибольшую толерантность к содержанию хлоридов в почве показали свекла и ячмень (всхожесть 79,0–92,1 % к контролю – засоленная почва), достаточно высокая всхожесть семян отмечена у мятлика (до 80,0 %), наиболее чувствительной к засолению оказалась фацелия. причем как по уровню всхожести семян (71,5–78,2 %), так и по морфометрическим показателям.

Заклучение. Установлена тенденция увеличения загрязнения подземных вод в зоне воздействия складирования галитовых отходов в течение времени хранения, при этом начиная с 2010 г. наблюдается значительный рост содержания хлоридов в воде, продолжающийся и в настоящее время. Область загрязнения вытянута в северном и восточном направлениях, что соответствует направлениям потоков подземных вод в сторону их дренажа – к рекам Сивельга и Случь.

Засоление почвы отмечено на значительном удалении от террикона (300 м) и составило 0,4 г/кг, при этом установлено проникновение хлорид-ионов на глубину до 0,6 м. Внесение торфа в соотношении почва : торф 30 : 1 приводит к снижению концентрации хлоридов на 27–37 % по сравнению с исходной засоленной почвой во всех диапазонах концентраций. При этом лучший эффект отмечается при использовании осокового торфа высокой степени разложения.

Среди протестированных растений-галофитов наиболее толерантными к засолению сельскохозяйственными культурами проявили себя свекла и ячмень, достаточно устойчив к присутствию в почве хлоридов мятлик. При увеличении нормы высева семян на 20 % эти культуры можно рекомендовать не только к возделыванию на слабо засоленных землях, но и для этапа биологической рекультивации почвы с высокой степенью засоления.

Список использованных источников

1. Обращение с отходами // Экологический бюллетень / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – 2023. – Гл. 4.4. – Режим доступа: <https://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/2022/Sostojanie-prirodnoj-sredy-Belarusi-za-2022>. – Дата доступа: 12.04.2024.
2. Шемет, С. Ф. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений / С. Ф. Шемет, А. А. Кологривко // Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 100–105.
3. Проведение оценки воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной деятельности по объекту «3 РУ. СОФ. Развитие солеотвала по линии ОШ № 3 и № 4» [Электронный ресурс] : отчет. – Режим доступа: <https://soligorsk.gov.by/uploads/files/18-05-2023-009.pdf>. – Дата доступа: 12.04.2024.
4. Анализ воздействия хранилищ отходов калийного производства на окружающую среду и подходы к выбору рационального способа их складирования [Электронный ресурс] / Т. А. Петрова [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14, № 3. – Режим доступа: <https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf>. – Дата доступа: 12.04.2024.
5. Метод биологической рекультивации территорий с высокой засоленностью почв на основе энергетических плантаций древесных растений / О. И. Родькин, Т. Volk, И. А. Басалай, Е. В. Черненко // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. по материалам V Междунар. науч. экол. конф. / Куб. гос. аграр. ун-т ; под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар, 2017. – С. 409–414.
6. Головатый, С. Е. Влияние содержание натрия и хлора на урожайность яровых зерновых культур / С. Е. Головатый, З. С. Ковалевич, Н. К. Лукашенко // Почвоведение и агрохимия. – 2010. – № 1. – С. 148–156.
7. Судник, А. В. О последствиях применения в качестве противогололедного реагента хлорида натрия на состояние насаждений вдоль улиц и дорог в г. Минске [Электронный ресурс] / А. В. Судник, А. П. Яковлев. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/270769>. – Дата доступа: 12.04.2024.
8. Демидова, М. И. Влияние галитовых отходов ОАО «Уралкалий» города Березники на почву и растительность / М. И. Демидова, Ю. Е. Лихарева, В. К. Лапшина // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 2. – С. 154–166.
9. Локальный мониторинг окружающей среды // Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://nsmos.by/sites/default/files/2023-08/11%20LOCAL%20Monitoring%202021.pdf>. – Дата доступа: 12.04.2024.
10. Средняя температура воздуха, осадки, скорости ветра и повторяемости направлений ветра за весь период наблюдений на метеостанции Случь. – Минск : Республиканский гидрометеорологический центр, 2018.

References

1. *Obrashchenie s otkhodami* [Waste Management]. *Ehkologicheskij byulleten'* = *Environmental Bulletin*. Ch. 4.4. Available at: <https://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/2022/Sostojanie-prirodnoj-sredy-Belarusi-za-2022> (accessed April 12, 2024). (in Russian)
2. Shemet S. F., Kologrivko A. A. *Snizhenie geoehkologicheskikh posledstvij pri podzemnoj razrabotke kalijnykh mestorozhdenij* [Reduction of geoecological consequences in the underground development of potash deposits]. *Gornyj zhurnal* = *Mining Journal*, 2015, no. 5, pp. 100–105. (in Russian)
3. *Otchet "Provedenie ocenki vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu planiruemoj khozyajstvennoj deyatel'nosti ob"ektu "3 RU. SOF. Razvitie soleotvala po linii OSH № 3 i № 4""* [Report "Environmental impact assessment of the planned economic activity to the object "3 RU. SOF. Development of salt dump along the line of OSH No. 3 and No. 4""]. Available at: <https://soligorsk.gov.by/uploads/files/18-05-2023-009.pdf> (accessed April 12, 2024). (in Russian)

4. Petrova T. A., Astapenko T. S., Kologrivko A. A., Dolgikh A. S. *Analiz vozdejstviya khranilishch otkhodov kalijnogo proizvodstva na okruzhayushchuyu sredu i podkhody k vyboru racional'nogo sposoba ikh skladirovaniya* [Analysing the environmental impact of potash waste storage facilities and approaches to selecting a rational method of their storage]. *Vestnik evrazijskoj nauki = Bulletin of Eurasian Science*, 2022, vol. 14, no. 3. Available at: <https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf> (accessed April 12, 2024). (in Russian)
5. Rod'kin O. I., Volk T., Basalai I. A., Chernenok E. V. *Metod biologicheskoy rekul'tivacii territorij s vysokoj zasolenost'yu pochv na osnove ehnergeticheskikh plantacij drevesnykh rastenij* [Method of biological reclamation of territories with high soil salinity on the basis of energy plantations of woody plants]. *Problemy rekul'tivacii otkhodov byta, promyshlennogo i sel'skokhozyajstvennogo proizvodstva: sb. nauch. tr. po materialam V Mezhdunar. nauch. ehkol. konf* [Proc. of the V Int. sci. ecological conf. "Problems of reclamation of household waste, industrial and agricultural production"]. Krasnodar, 2017, pp. 409–414. (in Russian)
6. Golovatyj S. E., Kovalevich Z. S., Lukashenko N. K. *Vliyanie sodержание natriya i khloro na urozhajnost' yarovykh zernovykh kul'tur* [Influence of sodium and chlorine content on the yield of spring grain crops]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil science and agrochemistry*, 2010, no. 1, pp. 148–156. (in Russian)
7. Sudnik A. V., Yakovlev A. P. *O posledstviyakh primeneniya v kachestve protivogolodnogo reagenta khlorida natriya na sostoyanie nasazhdenij vdol' ulic i dorog v g. Minske* [On the consequences of the use of sodium chloride as an anti-icing agent on the condition of plantings along streets and roads in Minsk]. Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/270769> (accessed April 12, 2024). (in Russian)
8. Demidova M. I., Likhareva Yu. E., Lapshina V. K. *Vliyanie galitovykh otkhodov OAO "Uralkali" goroda Berezniki na pochvu i rastitel'nost'* [Influence of halite wastes of JSC "Uralkali" of Berezniki on soil and vegetation]. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ehkologiya. Urbanistika = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urban development*, 2014, no. 2, pp. 154–166. (in Russian)
9. *Lokal'nyj monitoring okruzhayushchej sredy. Nacional'naya sistema monitoringa okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'* [Local environmental monitoring. National system of environmental monitoring of the Republic of Belarus], Available at: <https://nsmos.by/sites/default/files/2023-08/11%20LOCAL%20Monitoring%202021.pdf> (accessed April 12, 2024). (in Russian)
10. *Srednyaya temperatura vozdukh, osadki, skorosti vetra i povtoryaemosti napravlenij vetra za ves' period nablyudenij na meteostancii Sluck* [Average air temperature, precipitation, wind speed and wind direction frequency of occurrence for the entire observation period at Slutsk weather station]. Minsk, Republican Hydrometeorological Centre, 2018. (in Russian)

Информация об авторах

Хрипович Анна Александровна – кандидат технических наук, доцент Белорусского национального технического университета (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь). E-mail: anna.hripovich@gmail.com

Тишковская Елизавета Александровна – аспирант Белорусского национального технического университета (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь). E-mail: tishkovskaya@bntu.by

Information about the authors

Hanna A. Khripovich – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Av., 220013, Minsk, Belarus. E-mail: anna.hripovich@gmail.com

Elizaveta A. Tsishkouskaya – Graduate student, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Av., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: tishkovskaya@bntu.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-88-94>
УДК 633.1:551.583(476)

Поступила в редакцию 18.03.2024
Received 18.03.2024

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СРОКОВ СЕВА ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ С УЧЕТОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

В. И. Мельник, Ю. А. Бондаренко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье показана важность проведения сева озимых зерновых культур в осенний период в оптимальные сроки с учетом температуры воздуха, рельефа и механического состава почв. Показано изменение сроков сева озимой пшеницы по территории Беларуси при учете прогнозной температуры воздуха на сентябрь. Определены оптимальные сроки сева озимых культур для административных областей и районов с учетом прогнозируемой температуры воздуха на сентябрь. На основании литературных источников составлены поправочные значения к температуре воздуха в зависимости от различных типов рельефа и почв и их влияние на дату сева. На примере Логойского района Минской области рассчитаны сроки сева озимой пшеницы для конкретного поля с учетом прогноза температуры воздуха на сентябрь и микроклимата поля (рельеф, механический состав почвы). Анализ полученных данных показывает, что использование поправок в пределах хозяйства с учетом микроклимата поля (рельеф и почвы) и прогноза температуры воздуха на сентябрь может приводить к сдвигу сроков сева озимых культур до 8–10 дней в пределах хозяйства (района) по отношению к многолетним данным. Полученные результаты могут стать основой для планирования оптимальных сроков сева озимых зерновых культур на всех уровнях (от административных областей и районов до фермерских хозяйств).

Ключевые слова: оптимальные сроки сева; изменение климата; микроклимат.

Для цитирования. Мельник В. И., Бондаренко Ю. А. Определение оптимальных сроков сева озимых зерновых культур на территории Беларуси с учетом региональных и локальных климатических изменений // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 88–94.

THE DETERMINATION OF OPTIMAL TIMES FOR SOWING WINTER GRAIN CROPS IN THE TERRITORY OF BELARUS TAKING INTO ACCOUNT REGIONAL AND LOCAL CLIMATIC FEATURES

V. I. Melnik, Yu. A. Bondarenko

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

Abstract. The article shows the importance of sowing winter grain crops in autumn at optimal times, taking into account the relief and mechanical composition of the soil. The change of sowing dates of winter wheat on the territory of Belarus taking into account the forecast air temperature for September is shown. The optimal timing of sowing winter wheat for administrative regions and districts has been determined. Using the example of Logoisk district of Minsk region, the optimal timing of sowing winter wheat for a specific field was calculated, taking into account the forecast of air temperature for September and the microclimate of the field (topography, soil texture). The results obtained can become the basis for planning the optimal timing of sowing winter grain crops at all levels (from administrative regions and districts to farms).

Keywords: optimal timing of sowing; climate change; microclimate.

For citation. Melnik V. I., Bondarenko Yu. A. The determination of optimal times for sowing winter grain crops in the territory of Belarus taking into account regional and local climatic features. *Nature Management*, 2024, no.1, pp. 88–94.

Введение. Ведение сельскохозяйственного производства должно проводиться на основе новых знаний о климатических изменениях и связанных с ними количественных оценок изменения агроклиматических показателей. Сказанное относится не только к характеристике показателей вегетационного периода, но и к отдельным приемам и технологиям возделывания сельскохозяйственных культур, среди которых важным является выбор оптимальных сроков сева. На долю озимых зерновых культур

в республике в среднем приходится 55–60 % валового сбора. Как правило, урожайность озимых зерновых культур практически во все годы превосходит урожайность яровых. Объясняется это тем, что озимые культуры в связи с более ранним развитием лучше используют весенние запасы влаги в почве и меньше подвергаются засухам. Однако колебания урожайности озимых часто бывают не менее значительными, чем яровых и объясняются не только агрометеорологическими условиями весенне-летнего периода, но и условиями сева, осенней вегетации и перезимовки растений, вклад которых в конкретные годы колеблется от 25 до 40 % [1].

Для озимых зерновых культур сроки сева устанавливаются с таким расчетом, чтобы растения до прекращения вегетации хорошо раскустились и приобрели закалку к низким температурам в зимний период. При этом сев озимых культур раньше или позже оптимальных сроков может привести к снижению урожая до 1 % за сутки по причине перерастания и более значительного повреждения посевов вредителями и болезнями в зимний период или из-за недостаточного осеннего кущения и ухудшения перезимовки [1].

Результаты предыдущих исследований. В ранее выполненных работах на основании литературных источников, последних исследований белорусских ученых, данных пунктов наблюдений гидрометеорологической сети за фазами развития озимых культур осеннего периода, результатов исследований по кустистости, для территории Беларуси установлены следующие критерии сумм активных температур, определяющие начало и конец сева озимых культур: для озимой пшеницы – 465 °С (начало сева) и 350 °С для периода «посев – начало кущения» (конец сева), для озимого тритикале – 435–320 °С, для озимой ржи – 405–290 °С соответственно [2, 3]. На основании принятых критериев были рассчитаны многолетние сроки начала и окончания сева озимых культур за период 2000–2020 гг., характеризующий последние изменения климата по областям и административным районам.

Проведенный анализ материалов помог установить наиболее тесную связь между оптимальным сроком начала сева озимых культур и средней температурой воздуха за конкретный осенний период. Ниже приведен график зависимости начала сева озимой пшеницы от средней температуры воздуха за период с 10 сентября по 15 ноября (рис. 1).

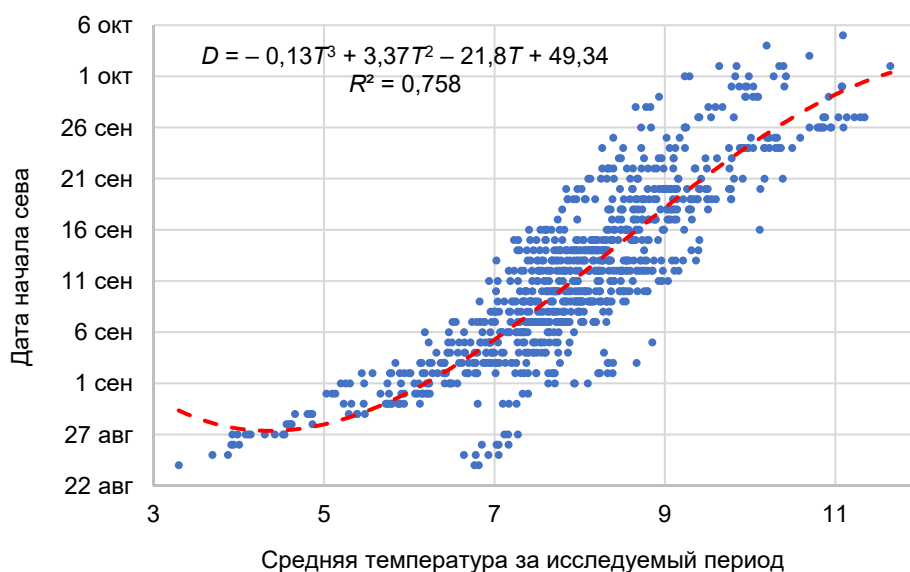


Рис. 1. Зависимость даты начала сева озимой пшеницы от средней температуры воздуха за период с 10 сентября по 15 ноября, 2000–2020 гг.

Fig. 1. Dependence of the start date of winter wheat sowing on the average air temperature for the period from September 10 to November 15, 2000–2020

В представленном на рис. 1 уравнении: D – искомая дата начала оптимального срока сева озимой пшеницы (количество дней, прошедших с 20 августа); T – средняя температура воздуха за период (с 10 сентября по 15 ноября) по ближайшему пункту наблюдений. Аналогичным способом были рассчитаны и оптимальные сроки окончания сева озимых культур. Рассчитанные многолетние сроки начала и окончания сева озимых культур за период 2000–2020 гг. по областям приведены в табл. 1 и отражают средние климатические условия указанного периода.

Таблица 1. Оптимальные сроки начала и конца сева озимых зерновых культур за 2000–2020 гг. по областям Беларуси**Table 1. Optimal dates for the start and end of sowing winter grain crops for 2000–2020 by regions of Belarus**

Область	Озимые зерновые	В том числе		
		озимая пшеница	озимое тритикале	озимая рожь
Витебская	05.09–23.09	05.09–18.09	07.09–20.09	10.09–23.09
Минская	08.09–30.09	08.09–23.09	10.09–25.09	12.09–30.09
Гродненская	08.09–02.10	08.09–27.09	10.09–29.09	13.09–02.10
Могилёвская	06.09–27.09	06.09–21.09	08.09–23.09	10.09–27.09
Брестская	13.09–08.10	13.09–01.10	16.09–06.10	18.09–08.10
Гомельская	10.09–02.10	10.09–26.09	13.09–29.09	15.09–02.10

Результаты и их обсуждение. Оптимальные сроки сева озимых культур для каждого района были рассчитаны с помощью интерполирования соседних станционных данных [4].

Для каждого конкретного года проведение сроков сева должно базироваться на складывающихся текущих агрометеорологических условиях с учетом возможного изменения температуры воздуха в осенний период. Для этого были разработаны алгоритмы коррекции и расчетные методы определения оптимальных сроков сева озимых культур с учетом прогноза температуры воздуха на сентябрь [5, 6].

Анализ данных показывает, что в большинстве случаев увеличение (уменьшение) температуры воздуха в сентябре на 1–2 °C приводит к сдвигу сроков сева соответственно на 2–4 дня позже (раньше) по отношению к средним многолетним значениям.

Для прогнозирования оптимальных сроков сева озимых культур по административным областям необходимо средние оптимальные сроки сева по каждой культуре, указанные в табл. 1, сдвинуть на 2–4 дня в зависимости от прогнозной температуры на сентябрь (1–2 °C) или получить из таблицы (см. приложение) по административным районам. Для примера на рис. 2 наглядно показано изменение сроков сева озимой пшеницы по территории Беларуси при учете прогнозной температуры воздуха на сентябрь (увеличение температуры воздуха на +2 °C).

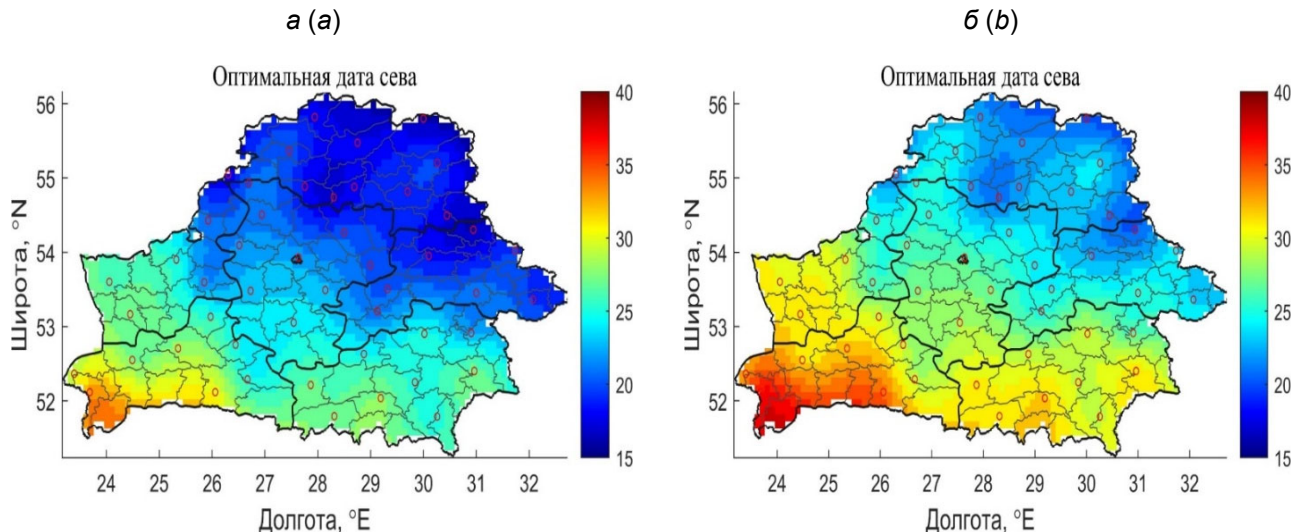


Рис. 2. Оптимальные сроки сева озимой пшеницы для территории Республики Беларусь:
а – средние многолетние значения; б – значения с учетом прогноза температуры воздуха на сентябрь.
 Цветом отмечено количество дней с 20 августа

Fig. 2. Optimal timing of sowing winter wheat for the territory of the Republic of Belarus:
а – average long-term values; б – term values taking into account the air temperature forecast for September.
 The color indicates the number of days since August 20

Расчеты оптимальных сроков сева озимых зерновых культур для конкретного поля. При переходе на более дифференцированный уровень проведения агротехнических мероприятий, соответствующий конкретным полям хозяйства, важное значение приобретает учет микроклимата полей. Так, например, в сентябре на южных склонах с уклоном 10° суммарная радиация на 5–9 % больше,

а на северных склонах – на 7–11 % меньше, чем на горизонтальной поверхности. Супесчаные и легкосуглинистые почвы обычно теплее глинистых и тяжелосуглинистых [7–9]. На основании литературных источников составлена табл. 2 поправок температуры на рельеф и тип почвы. Поправочные значения для сроков сева в зависимости от рельефа и почвы рассчитаны в совокупности с прогнозом температуры воздуха только на сентябрь как наиболее теплую часть осеннего периода (см. приложение).

Таблица 2. Поправочные значения к температуре воздуха в зависимости от различных типов рельефа и почв и их влияние на дату сева

Table 2. Correction values for air temperature depending on different types of terrain and soils and their influence on the sowing date

Показатель	Поправка (изменение) температуры, °C	Изменение даты начала сроков сева озимых, дни
<i>Форма рельефа</i>		
Вершины холмов и южные склоны крутизной до 10°	1	–1...–3
Северные склоны крутизной до 10° и прилегающие части дна нешироких долин	–1	+2...+3
Западные и восточные части склонов, равнины	0	0
<i>Почва</i>		
Песчаная, супесчаная	+2,0	–3...–5
Легкосуглинистая	+1,0	–1...–3
Среднесуглинистая	0	0
Тяжелосуглинистая, глинистая	–1,0	+1...+3

В хозяйствах для полей с выраженным рельефом желательно вводить соответствующие поправки к срокам сева озимых на рельеф конкретного поля с учетом типа почвы. На пологих северных склонах (крутизна до 10°), получающих меньше тепла, чем ровное место, сев следует начинать на 2–3 дня раньше, чем указано в таблице (см. приложение), а на южных склонах той же крутизны, наоборот, можно сеять на 2–3 дня позднее. На тяжелых суглинистых почвах сев необходимо начинать на 2–3 дня раньше. Чем разнообразнее почвенно-климатические условия области (района), тем более дифференцированы сроки сева культур.

Пример расчета начала оптимального срока сева озимой пшеницы в Логойском районе на поле с легкосуглинистой почвой на южном склоне при прогнозе температуры воздуха на сентябрь на 2 °C выше нормы.

1. По таблице (см. приложение) находим средний многолетний срок начала сева озимой пшеницы для Логойского района – 8 сентября.

2. По прогнозу температура сентября ожидается на 2 °C выше нормы, для легкосуглинистой почвы поправка еще +1 °C (см. табл. 2) и, учитывая южный склон, вводим поправку еще +1 °C, т. е. всего увеличение температуры воздуха для конкретного места (поля) в целом составит 4 °C.

3. По таблице (см. приложение) находим уточненный срок оптимального сева для данного года при увеличении суммарной поправки на 4 °C – 16 сентября.

4. Для полей с северным склоном крутизной не более 10° и тяжелой почвой в указанном районе уточненный оптимальный срок начала сева озимой пшеницы в соответствии с таблицей (см. приложение) составит 8 сентября (+2 °C – поправка на прогноз, –1 °C поправка на почву и –1 °C поправка на рельеф). Суммарная поправка равна 0 °C.

Анализ полученных данных показывает, что использование поправок в пределах хозяйства с учетом микроклимата поля (рельеф и почвы) и прогноза температуры воздуха на сентябрь может приводить к сдвигу оптимальных сроков сева озимых культур до 8–10 дней в пределах хозяйства (района) по отношению к многолетним данным. Недоучет поправок и, соответственно, посев озимых раньше или позже оптимальных сроков, согласно исследованиям, может привести впоследствии к снижению урожая до 10 % [1]. В настоящее время в Институте природопользования НАН Беларуси разработан программный продукт расчета оптимальных сроков сева озимых зерновых культур для области, района и конкретного поля с учетом прогноза температуры воздуха на сентябрь и микроклимата поля.

Приложение
Application

Оптимальные сроки сева озимой пшеницы с учетом суммарной поправки для отдельных районов Минской области

Optimal timing for sowing winter wheat, taking into account the total amendment for individual districts of the Minsk region

Район Минской области	Средняя темпера- тура, °C	Средние многолетние значения	Суммарная поправка температуры*, °										
			–5	–4	–3	–2	–1	0	1	2	3	4	5
Борисовский	7,45	08.09–17.09	31.08– 09.09	01.09– 10.09	03.09– 12.09	04.09– 13.09	06.09– 15.09	08.09– 17.09	10.09– 19.09	12.09– 21.09	14.09– 23.09	16.09– 25.09	18.09– 26.09
Воложинский	7,83	10.09–20.09	01.09– 11.09	03.09– 12.09	05.09– 14.09	06.09– 16.09	08.09– 18.09	10.09– 20.09	13.09– 22.09	15.09– 23.09	17.09– 25.09	19.09– 27.09	21.09– 29.09
Дзержинский	8,00	12.09–21.09	02.09– 12.09	04.09– 13.09	06.09– 15.09	08.09– 17.09	09.09– 19.09	12.09– 21.09	14.09– 23.09	16.09– 25.09	18.09– 26.09	20.09– 28.09	22.09– 30.09
Крупский	7,44	08.09–17.09	31.08– 09.09	01.09– 10.09	03.09– 12.09	04.09– 13.09	06.09– 15.09	08.09– 17.09	10.09– 19.09	12.09– 21.09	14.09– 23.09	16.09– 25.09	18.09– 26.09
Логойский	7,49	08.09–17.09	31.08– 09.09	01.09– 10.09	03.09– 12.09	05.09– 14.09	06.09– 15.09	08.09– 17.09	10.09– 19.09	12.09– 21.09	14.09– 23.09	16.09– 25.09	19.09– 27.09
Любанский	8,28	13.09–23.09	04.09– 14.09	05.09– 16.09	07.09– 17.09	09.09– 19.09	11.09– 21.09	13.09– 23.09	15.09– 25.09	18.09– 27.09	20.09– 28.09	22.09– 30.09	23.09– 02.10
Пуховичский	7,95	11.09–21.09	02.09– 12.09	04.09– 13.09	05.09– 15.09	07.09– 17.09	09.09– 19.09	11.09– 21.09	13.09– 22.09	15.09– 24.09	17.09– 26.09	20.09– 28.09	21.09– 30.09

*Суммарная поправка приведена с учетом прогноза температуры на сентябрь, поправки на рельеф и тип почвы.

Заключение. Полученные результаты исследований могут быть использованы для планирования оптимальных сроков сева озимых зерновых культур на всех уровнях (от административных областей и районов до фермерских хозяйств) с учетом прогноза температуры воздуха на сентябрь и микроклимата поля.

Список использованных источников

1. Зерновые культуры / Д. Шпаар [и др.] ; под ред. Д. Шпаара. – Минск : ФУАинформ, 2000. – 442 с.
2. Оценка изменений агроклиматических ресурсов территории Республики Беларусь в период осеннего сева озимых зерновых культур / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2022. – № 1. – С. 5–15.
3. Шашко, К. Г. Оптимизация сроков сева озимых зерновых культур в связи с потеплением климата Беларуси / К. Г. Шашко, Ф. И. Привалов, В. В. Холодинский // Земледелие и селекция Беларуси. – 2014. – Вып. 50. – С. 179–187.
4. Отчет о НИР «Диагноз, моделирование и прогнозирование естественных и антропогенных изменений климата с целью оценки их воздействий на окружающую среду и условия жизнедеятельности населения Беларуси». ГПНИ Природные ресурсы и окружающая среда подпрограмма 10.1 «Природные ресурсы и их рациональное использование», задание № 1.04 «Модельные оценки влияния процессов обводнения и заболачивания территорий Беларуси на микроклимат прилегающей местности» (промежуточный). – Минск, 2023. – Гл. 4. – С. 96–107.
5. Определение оптимальных сроков сева озимых культур на территории Беларуси в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 1 (383). – С. 108–125.
6. Сроки сева озимых культур на территории Беларуси и рекомендации по их оптимизации в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. агр. навук. – 2023. – Т. 61, № 3. – С. 222–233. doi:10.29235/1817-7204-2023-61-3-222-233
7. Ковриго, П. А. Метеорология и климатология : учеб. / П. А. Ковриго. – Минск : Вышэйшая школа, 2022. – 414 с.
8. Щербань, М. И. Микроклиматология / М. И. Щербань. – Киев : Вища школа головное издательство, 1985. – 224 с.
9. Справочник по климату Беларуси / под общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 2007. – Ч. 5 : Влажность воздуха Солнечное сияние. Метеорологическая дальность видимости. – 68 с.

References

1. Shpaar D., Adam L., Ginapp C. [et al.]. *Zernovye kul'tury* [Grain crops]. Ed. by D. Shpaar. Minsk, 2000, 442 p. (in Russian).
2. Melnik V. I., Brovka Yu. A., Bondarenko Yu. A., Buyakov I. V., Shumskaya T. G. *Ocenka izmenenij agroklimaticheskikh resursov territorii Respubliki Belarus' v period osennego seva ozimyh zernovykh kul'tur* [Assessment of changes in agro-climatic resources on the territory of Belarus during the autumn sowing of winter grain crops]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2022, no. 1, pp. 5–15 (in Russian).
3. Shashko K. G., Privalov F. I., Kholodinsky V. V. *Optimizatsiya srokov seva ozimyh zernovykh kul'tur v svyazi s potepieniem klimata Belarusi* [Optimization of solving terms of winter cereal crops due to climate warning in Belarus]. *Zemledelie i selektsiya Belarusi = Arable Farming and Plant Breeding in Belarus*, 2014, vol. 50, pp. 179–187 (in Russian).
4. *Otchet o NIR "Diagnoz, modelirovanie i prognozirovanie estestvennykh i antropogennykh izmenenij klimata s cel'yu ocenki ih vozdeystviy na okruzhayushchuyu sredu i usloviya zhiznedeyatel'nosti naseleniya Belarusi". GPNI Prirodnye resursy i okruzhayushchaya sreda podprogramma 10.1 "Prirodnye resursy i ih racional'noe ispol'zovanie", zadanie № 1.04 "Model'nye ocenki vliyaniya processov obvodneniya i zabolachivaniya territorij Belarusi na mikroklimat prilgayushchej mestnosti" (promezhutochnyj)* [Research report "Diagnosis, modeling and forecasting of natural and anthropogenic climate changes in order to assess their impacts on the environment and living conditions of the population of Belarus". State Public Research Institute Natural Resources and Environment subprogram 10.1 "Natural resources and their rational use", task no. 1.04 "Model assessments of the impact of watering and swamping processes in the territories of Belarus on the microclimate of the surrounding area" (interim).]. Minsk, 2023, ch. 4, pp. 96–107 (in Russian).
5. Melnik V. I., Bondarenko Yu. A., Brovka Yu. A., Khitrykau M. A. *Opredelenie optimal'nykh srokov seva ozimyh kul'tur na territorii Belarusi v usloviyakh sovremennogo izmeneniya klimata* [Determination of optimal sowing periods for winter crops on the territory of Belarus in the context of modern climate change]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorologist. Research and forecasts*, 2022, no. 1 (383), pp. 108–125 (in Russian).
6. Melnik V. I., Bondarenko Yu. A., Brovka Yu. A., Khitrykau M. A. *Sroki seva ozimyh kul'tur na territorii Belarusi i rekomendatsii po ih optimizatsii v usloviyakh sovremennogo izmeneniya klimata* [The timing of sowing winter crops on the territory of Belarus and recommendations for their optimization in the conditions of modern climate change]. *Vesci Natsyonal'noj akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2023, vol. 61, no. 3, pp. 222–233. doi:10.29235/1817-7204-2023-61-3-222-233 (in Russian).

7. Kovrigo P. A. *Meteorologiya i klimatologiya: uchebnik* [Meteorology and climatology: textbook]. Minsk, Higher School Publ., 2022, 414 p. (in Russian).
8. Shcherban M. I. *Mikroklimatologiya* [Microclimatology]. Kiev, Vishcha School Head Publ., 1985, 224 p. (in Russian).
9. *Spravochnik po klimatu Belarusi* [Handbook on the Climate of Belarus]. Ed. by V. I. Melnik. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus Publ., 2007, *chast' 5. Vlazhnost' vozduha Solnechnoe siyanie. Meteorologicheskaya dal'nost' vidimosti* [part 5. Air humidity Sunshine. Meteorological visibility range], 68 p. (in Russian).

Информация об авторах

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

Бондаренко Юрий Александрович – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: bondarenyura@gmail.com

Information about authors

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

Yuri A. Bondarenko – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: bondarenyura@gmail.com

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ *GEOLOGY. MINERALS*

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-95-112>
УДК 551.89(476.1+476.4+476.6)

Поступила в редакцию 18.03.2024
Received 18.03.2024

ЛАНДШАФТЫ КЛИМАТИЧЕСКОГО ОПТИМУМА МУРАВИНСКОГО МЕЖЛЕДНИКОВЬЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ БЕЛАРУСИ

А. В. Матвеев, Т. Б. Рылова, А. В. Шидловская

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе палеогеоморфологической схемы М 1 : 500 000, составленной по материалам изучения разрезов буровых скважин, а также данных о составе флоры и характере растительности в самой теплой фазе муравинского межледниковья, полученных в результате палинологических исследований геологических разрезов, выполнена реконструкция палеоландшафтов территории Центральной Беларуси в самой теплой фазе климатического оптимума муравинского межледниковья. Палеогеоморфологические реконструкции позволили на основании характера рельефа и свойств подстилающих пород выделить 7 родов ландшафтов, которые, в свою очередь, в зависимости от глубины залегания грунтовых вод и типа лесной растительности подразделены на 12 видов. В рамках видов выделены 19 подвидов, отражающих более детальный состав лесных ассоциаций.

Ключевые слова: муравинское межледниковье; палеогеоморфологическая схема; палинофлора; растительность; палеоландшафты; Центральная Беларусь.

Для цитирования. Матвеев А. В., Рылова Т. Б., Шидловская А. В. Ландшафты климатического оптимума муравинского межледниковья на территории Центральной Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 95–112.

LANDSCAPES OF THE CLIMATIC OPTIMUM OF THE MURAVIAN INTERGLACIAL ON THE AREA OF CENTRAL BELARUS

A. V. Matveev, T. B. Rylova, A. V. Shidlovskaya

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

Abstract. A reconstruction of the paleolandscapes of the area of Central Belarus for the warmest phase of the Muravian interglacial climatic optimum was carried out. The basis for the reconstruction was paleogeomorphological scheme based on the data of borehole sections, data on the composition of the flora and vegetation features obtained as the result of palynological studies. Paleogeomorphological reconstructions based on the nature of the relief and the properties of the underlying rocks made it possible to identify 7 genera of landscapes, which are divided into 12 species according to the depth of groundwater and the type of forest vegetation. These species can be divided into 19 subspecies reflecting a more detailed composition of forest associations.

Keywords: Muravian interglacial; paleogeomorphological scheme; palynoflora; vegetation; paleolandscapes; Central Belarus.

For citation. Matveev A. V., Rylova T. B., Shidlovskaya A. V. Landscapes of the climatic optimum of the Muravian interglacial on the area of Central Belarus. *Nature Management*, 2024, no.1, pp. 95–112.

Введение. Как показали выполненные ранее исследования [1, 2], для выявления естественного тренда и прогноза изменения современных природных обстановок, а также оценок степени комфортности окружающей среды для населения целесообразно проводить сопоставление современных природных комплексов с предшествующими этапами развития (на территориях распространения плейстоценовых ледниковых покровов – с межледниковьями и, в частности, с наиболее изученным мура-

винским этапом). Поэтому при выполнении задания «Оценка геоэкологических рисков на территории Беларуси с учетом динамики ландшафтов и особенностей геодинамических, гидрогеологических и геохимических условий» подпрограммы 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. авторы на первом этапе исследований основное внимание уделяли палеогеографическим реконструкциям. Результаты этих исследований позволили построить палеоландшафтную схему территории Центральной Беларуси в оптимуме муравинского межледниковья.

Материалы и методы исследований. Палеоландшафты, существовавшие в климатическом оптимуме муравинского межледниковья на территории центральной части Беларуси, реконструированы на основе опубликованных данных о палеогеографических особенностях территории в это время [3–7 и др.], палеогеоморфологической схемы М 1 : 500 000 [8], составленной по материалам изучения разрезов скважин в районе исследований, а также сведений о составе флоры и характере растительности в самой теплой фазе муравинского межледниковья [9], полученных в результате детального анализа и обобщения материалов палинологических исследований геологических разрезов, расположенных на территории Центральной Беларуси (Понемунь [10 и др.], Комотово [11], Тимошковицы [3], Карачевщина [12], Заславль [13, 14 и др.], Кузевичи [15], Мурава [3, 16, 17], Черноосово [18], Азаричи [19, 20] и др.), соседних районов Литвы (Йоненис, Медининкай, Нятесос, Гайдунай [21] и др.), Польши (Hogorszki Duże, Szwańcaria, Otary [22, 23 и др.] и др.) и России (Микулино, Нижняя Боярщина, скв. 1013 у д. Смелый и др. [24–28 и др.]) (рис. 1).

Использованы также данные о продукции и рассеивании пыльцы и спор различных растений [29], биологических особенностях некоторых древесных пород и отношении их к основным факторам внешней среды [30], а также шкала Г. Элленберга [31], отражающая экологическую характеристику местообитаний различных видов древесных и травянистых растений (см. таблицу). Предполагалось, что особенности формирования ландшафтов муравинского времени были сходны с современными [32–34].

В настоящее время территория Беларуси относится к классу равнинных ландшафтов умеренно-континентального лесного типа. Выделяется два типа ландшафтов: бореальные смешано-лесные (подтаежный и южнотаежный подтипы) и суббореальные широколиственно-лесные (полесский подтип). Рассматриваемая в данной работе территория относится к подтаежному, а в северной и восточной частях – к южнотаежному подтипу [35, 36].

В оптимуме муравинского межледниковья территория Центральной Беларуси относилась к классу равнинных ландшафтов, умеренно-континентальному широколиственно-лесному типу. Самому теплomu времени термического оптимума муравинского межледниковья на территории западной части Центральной Беларуси отвечает фаза развития растительности *mr 4 Corylus–Quercus–Ulmus (+Hedera)*, а на территории центральной и восточной – фаза *mr 4 Corylus–Quercus–Tilia* [9]. В рассматриваемом регионе, как и на всей территории Беларуси, в это время максимума в лесных сообществах достигла доля термофильных древесных пород, прежде всего, лещины (*Corylus avellana* L., изредка *C. colurna* L.). Произрастали преимущественно широколиственные дубово-лещиновые леса с примесью вяза, липы, ясеня, клена и других пород. Возможно, существовали и лещиновые леса, в которых лещина была представлена как древесными, так и кустарниковыми формами [37, 38].

Характеристика палеоландшафтов. Палеогеоморфологические реконструкции позволили на основании характера рельефа и свойств подстилающих пород выделить 7 родов ландшафтов. Они, в свою очередь, в зависимости от глубины залегания грунтовых вод и типа лесной растительности подразделены на 12 видов. В рамках видов могут быть выделены 19 подвидов, отражающих более детальный состав лесных ассоциаций. Схема палеоландшафтов данного региона представлена на рис. 2, а условные обозначения к нему отражают классификацию ландшафтов климатического оптимума муравинского времени на территории Центральной Беларуси.

I ХОЛМИСТО-ГРЯДОВЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ПЕСЧАНЫХ, ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ И СУПЕСЧАНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ (включают 2 вида и 5 подвидов).

Данный род ландшафтов, в отличие от территории Белорусского Полесья [37, 38], имел довольно широкое распространение преимущественно в западной и центральной частях региона исследований, тяготея к наиболее возвышенным участкам.

I.1 Холмисто-грядовые лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод ниже 5 м с суходольными дубравами и дубравами грабовыми, с сосново-дубовыми лесами.

I.1a Холмисто-грядовые ландшафты с суходольными дубравами.

Данные ландшафты приурочены к Волковысской, Слонимской, Ошмянской, Минской, Оршанской и Горецко-Мстиславской возвышенностям. Здесь на почвах, получающих влагу из атмосферных осадков, произрастали суходольные дубравы, в которых основным эдификатором был дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), присутствовали дуб скальный (*Quercus petraea* Liebl.) и дуб пушистый (*Quercus pubescens* Willd.) – свето- и теплолюбивые виды, корневая система которых, в зависимости от почвенно-гидрологических условий, может проникать на глубину от 0,01 м до 38 м [39].

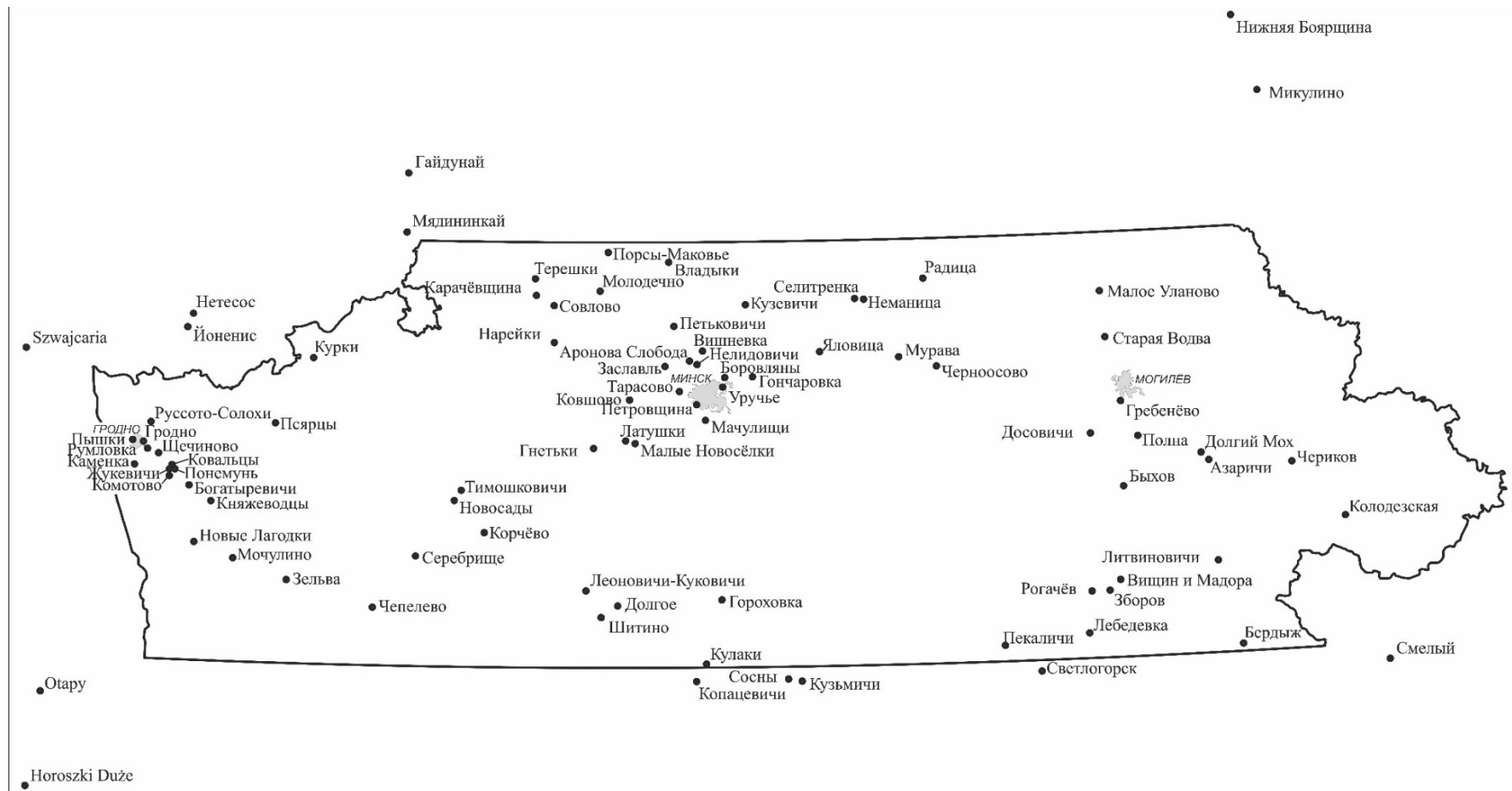


Рис. 1. Схема расположения наиболее представительных разрезов, вскрывающих отложения муравинского межледникового на территории Центральной Беларуси, изученных палинологическим методом

Fig. 1. Scheme of the location of the most representative sections revealing the Muravian interglacial deposits on the Central Belarus area studied by the palynological method

Экологические условия местообитания некоторых таксонов древесных пород (согласно шкале Г. Элленберга [31])

Ecological conditions of the habitat of several tree species taxa (according to H. Ellenberg's scale [31])

Вид	Требовательность		Континентальность	Влажность местообитаний
	к освещению	к климату		
<i>Acer campestre</i> L.	Теневыносливые растения	От умеренно теплого до теплого	Субокеанический (центральноевропейские и восточноевропейские виды)	Свежие местообитания (средневлажные)
<i>Acer platanoides</i> L.	От тенелюбивых до теневыносливых	От умеренно теплого до теплого	Субокеанический (центральноевропейские и восточноевропейские виды)	
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	Теневыносливые растения	Умеренный	От океанического до субокеанического (центральноевропейские виды)	Сырые местообитания (преимущественно бедные кислородом почвы)
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	От теневыносливых до светолюбивых	От прохладного до умеренного	Промежуточный (от слабо субокеанического до слабо субконтинентального)	Влажные местообитания (хорошо пропитанные влагой, но не сырые)
<i>Betula humilis</i> Schrank	Светолюбивые растения	Умеренный	Континентальный (виды, отмечающиеся в Центральной и Восточной Европе)	Сырые местообитания (преимущественно бедные кислородом почвы)
<i>Betula nana</i> L.	От светолюбивых до сильносветолюбивых	Прохладный	Субконтинентальный (восточно-центральноевропейские и восточноевропейские виды)	Сырые местообитания (преимущественно бедные кислородом почвы)
<i>Betula pendula</i> Roth	Светолюбивые растения	—	—	—
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	Светолюбивые растения	—	—	От влажных до сырых местообитаний
<i>Carpinus betulus</i> L.	От тенелюбивых до теневыносливых	От умеренно теплого до теплого	Субокеанический (центральноевропейские и восточноевропейские виды)	—
<i>Corylus avellana</i> L.	От теневыносливых до светолюбивых	Умеренный	От океанического до субокеанического (центральноевропейские виды)	—
<i>Cotinus coggygria</i> Scop.	Светолюбивые растения	От теплого до крайне теплого, субсредиземноморский	Субокеанический (центральноевропейские и восточноевропейские виды)	Сухие местообитания (растения, встречающиеся на сухих почвах чаще, чем на свежих почвах)
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	От тенелюбивых до теневыносливых	Умеренный	От океанического до субокеанического (центральноевропейские виды)	—
<i>Hedera helix</i> L.	От тенелюбивых до теневыносливых	Умеренный	Океанический (западноевропейские и западно-центральноевропейские виды)	Свежие местообитания (средневлажные)
<i>Ligustrum vulgare</i> L.	Светолюбивые растения	От умеренно теплого до теплого	От океанического до субокеанического (центральноевропейские виды)	От сухих до свежих местообитаний
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	Теневыносливые растения	Прохладный	Субконтинентальный (восточно-центральноевропейские и восточноевропейские виды)	—
<i>Pinus sylvestris</i> L.	Светолюбивые растения	—	От субконтинентального до континентального	—
<i>Populus tremula</i> L.	От теневыносливых до светолюбивых	Умеренный	Промежуточный (от слабо субокеанического до слабо субконтинентального)	Свежие местообитания (средневлажные)
<i>Quercus petraea</i> L. ex Liebl.	От теневыносливых до светолюбивых	От умеренно теплого до теплого	Океанический (западноевропейские и западно-центральноевропейские виды)	Свежие местообитания (средневлажные)
<i>Quercus robur</i> L.	Светолюбивые растения	От умеренно теплого до теплого	Субконтинентальный (восточно-центральноевропейские и восточноевропейские виды)	—
<i>Tilia cordata</i> Mill.	Теневыносливые растения	Умеренный	Субокеанический (центральноевропейские и восточноевропейские виды)	Свежие местообитания (средневлажные)
<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	От тенелюбивых до теневыносливых	От умеренно теплого до теплого	Океанический (западноевропейские и западно-центральноевропейские виды)	От свежих до влажных местообитаний
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	От тенелюбивых до теневыносливых	Умеренный	От океанического до субокеанического (центральноевропейские виды)	От свежих до влажных местообитаний
<i>Ulmus laevis</i> Pall.	От тенелюбивых до теневыносливых	От умеренно теплого до теплого	Промежуточный (от слабо субокеанического до слабо субконтинентального)	От влажных до сырых местообитаний
<i>Ulmus minor</i> Mill.	Теневыносливые растения	Теплый климат	Промежуточный (от слабо субокеанического до слабо субконтинентального)	—
<i>Viscum album</i> L.	Светолюбивые растения	От умеренно теплого до теплого	От океанического до субокеанического (центральноевропейские виды)	—

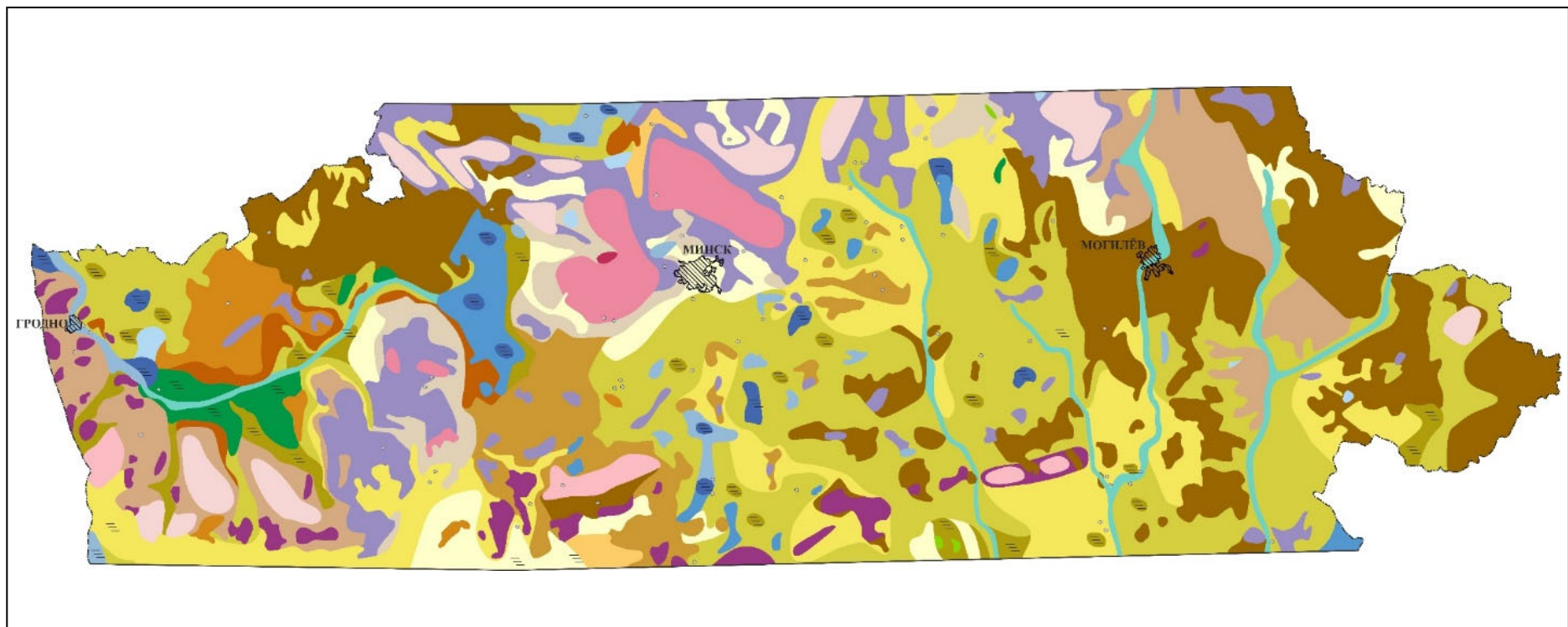









Рис. 2. Схема палеоландшафтов Центральной Беларуси в оптимуме муравинского межледникового. Условные обозначения см. на с. 100–102

Fig. 2. Scheme of paleolandscapes of Central Belarus area in the optimum of the Muravian interglacial. Legend see on p. 100–102





УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ LEGEND

I ХОЛМИСТО-ГРЯДОВЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ПЕСЧАНЫХ, ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ И СУПЕСЧАНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ HILLY AND RIDGED FOREST LANDSCAPES ON SAND, SANDY GRAVEL AND SANDY LOAM DEPOSITS

- | | | | |
|---|---|--|--|
| 

 | <p>I.1 Холмисто-грядовые лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод ниже 5 м с суходольными дубравами и дубравами грабовыми, с сосново-дубовыми лесами
Hilly-ridged forest landscapes with a depth to the groundwater table more than 5 m with dry oak, hornbeam and oak and mixed pine and oak forests</p> <p>I.1a Холмисто-грядовые ландшафты с суходольными дубравами
<i>Hilly-ridged landscapes with dry oak forests</i></p> <p>I.1б Холмисто-грядовые ландшафты с дубравами грабовыми с примесью липы, подлеском из лещины, калины, крушины, бирючины и др.
<i>Hilly-ridged landscapes with oak and hornbeam forests with an admixture of lime undergrowth of hazel viburnum, buckthorn, privet, etc.</i></p> <p>I.1в Холмисто-грядовые ландшафты со смешанными сосново-дубовыми лесами с участием липы, граба, лещины, бересклета и др.
<i>Hilly-ridged landscapes with mixed pine and oak forests with the participation of lime, hornbeam, hazel, euonymus, etc.</i></p> <p>I.2 Грядово-увалистые и грядово-холмистые лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод выше 5 м с дубравами и дубравами грабовыми
Ridged-undulating and ridged-hilly forest landscapes with a depth to the groundwater table less than 5 m with oak, hornbeam and oak forests</p> <td style="vertical-align: top; padding-left: 10px;"> 
  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>I.2a Грядово-увалистые ландшафты с дубравами, с заметной примесью липы, клена, лещины, изредка граба, рябины, подлеском из бересклета, калины, крушины и др.
<i>Ridged-undulating landscapes with oak forests with a noticeable admixture of lime, maple, hazel, rarely hornbeam, rowan, undergrowth of euonymus, viburnum, buckthorn, etc.</i></p> <p>I.2б Грядово-увалистые и грядово-холмистые ландшафты с дубравами грабовыми, с участием клена, липы, лещины, рябины, подлеском из бересклета, крушины, калины и других кустарников
<i>Ridged-undulating and ridged-hilly landscapes with oak and hornbeam forests with participation of maple, lime, hazel, rowan, undergrowth of euonymus, buckthorn, viburnum, etc.</i></p> </td> | 
 | <p>I.2a Грядово-увалистые ландшафты с дубравами, с заметной примесью липы, клена, лещины, изредка граба, рябины, подлеском из бересклета, калины, крушины и др.
<i>Ridged-undulating landscapes with oak forests with a noticeable admixture of lime, maple, hazel, rarely hornbeam, rowan, undergrowth of euonymus, viburnum, buckthorn, etc.</i></p> <p>I.2б Грядово-увалистые и грядово-холмистые ландшафты с дубравами грабовыми, с участием клена, липы, лещины, рябины, подлеском из бересклета, крушины, калины и других кустарников
<i>Ridged-undulating and ridged-hilly landscapes with oak and hornbeam forests with participation of maple, lime, hazel, rowan, undergrowth of euonymus, buckthorn, viburnum, etc.</i></p> |
|---|---|--|--|

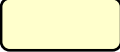




II ПОЛОГОВОЛНИСТЫЕ, МЕСТАМИ ВОЛНИСТЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА МОРЕННЫХ СУПЕСЯХ И СУГЛИНКАХ

GENTLY UNDULATING, SOMETIMES HUMMOCKY FOREST LANDSCAPES ON MORAIN SANDY LOAM AND LOAM

- | | |
|--|---|
| 


 | <p>II.1 Пологоволнистые, местами волнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод ниже 2 м с сосново-широколиственными, широколиственными дубовыми, липово-дубовыми и дубово-липовыми лесами
Gently undulating, hummocky forest landscapes with a depth to the groundwater table more than 2 m with mixed pine-broad-leaved, broad-leaved oak, lime, oak and lime forests</p> <p>II.1a Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с сосново-широколиственными (дуб, граб, липа, клен, лещина) лесами
<i>Gently undulating, hummocky landscapes with mixed pine-broadleaf (oak, hornbeam, lime, maple, hazel) forests</i></p> <p>II.1б Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с широколиственными, преимущественно дубовыми лесами со значительным участием граба, ясеня, клена, липы, вяза, лещины и обильным подлеском из бересклета, калины, крушины, бирючины
<i>Gently undulating, hummocky landscapes with broad-leaved oak forests with noticeable participation of hornbeam, ash, maple, lime, elm, hazel and dense undergrowth of euonymus, viburnum, buckthorn, privet</i></p> <p>II.1в Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с широколиственными, преимущественно липовыми лесами, с небольшой примесью дуба, граба, вяза, клена, лещины, с калиной, черемухой, крушиной в подлеске
<i>Gently undulating, hummocky landscapes with broad-leaved lime forests with a small admixture of oak, hornbeam, elm, maple, and undergrowth of viburnum, bird cherry, buckthorn</i></p> <p>II.1г Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с липово-дубовыми и дубово-липовыми лесами со значительным участием граба, вяза, клена, ясеня, лещины, ольхи, подлеском из крушины, бересклета, калины и др.
<i>Gently undulating, hummocky landscapes with lime-oak and oak-lime forests with noticeable participation of hornbeam, ash, hazel, alder and undergrowth of buckthorn, euonymus, viburnum, etc.</i></p> |
|--|---|



- II.2** Пологоволнистые, местами волнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод менее 2 м с дубравами с примесью широколиственных пород и ольхи; с дубово-вязовыми с участием ясеня лесами
Gently undulating, hummocky forest landscapes with a depth to the groundwater table less than 2 m with oak forests with admixture of other broad-leaved trees and alder; with oak and elm forests with ash participation
-  **II.2a** Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с дубравами, с участием других широколиственных пород (ясеня, клена, граба, липы, лещины) и ольхи, с подлеском из бересклета, крушины, бирючины
Gently undulating, hummocky landscapes with oak forests with other broad-leaved trees admixture (ash, maple, hornbeam, lime, hazel) and alder and undergrowth of euonymus, buckthorn, privet
-  **II.2b** Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с дубово-вязовыми лесами, с участием ясеня и небольшой, с примесью других широколиственных пород
Gently undulating, hummocky landscapes with oak-elm forests with ash participation and a small admixture of other broad-leaved trees

III ПОЛОГОВОЛНИСТЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ФЛЮВИОГЛЯЦИАЛЬНЫХ РАЗНОЗЕРНИСТЫХ ПЕСКАХ GENTLY UNDULATING FOREST LANDSCAPES ON FLUVIOGLACIAL VARIEGATED SANDS

- III.1** Пологоволнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод ниже 2 м с сосново-дубовыми и лещиново-дубовыми лесами
Gently undulating forest landscapes with a depth to the groundwater table more than 2 m with pine-oak and hazel-oak forests
-  **III.1a** Пологоволнистые ландшафты с хвойно-широколиственными, преимущественно сосново-дубовыми лесами с участием липы, граба, клена, вяза, лещины и др.
Gently undulating landscapes with mixed pine-oak forests with participation of lime, hornbeam, maple, elm, hazel, etc.
-  **III.1b** Пологоволнистые ландшафты с широколиственными, преимущественно лещиново-дубовыми лесами, с участием липы, граба, вяза и клена, с кустарниками в подлеске
Gently undulating landscapes with broad-leaved hazel-oak forests with participation of lime, hornbeam, elm and maple, with shrub undergrowth
- III.2** Пологоволнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод выше 2 м с сосново-широколиственными, лещиновыми и дубово-лещиновыми лесами, а также с черноольховыми фитоценозами и низинными болотами
Gently undulating forest landscapes with a depth to the groundwater table less than 2 m with pine-broadleaf, hazel, oak-hazel forests and black alder phytocenoses and lowland bogs
-  **III.2a** Пологоволнистые ландшафты с сосново-широколиственными (дуб, лещина, граб, липа, клен, вяз) лесами
Gently undulating landscapes with pine-broadleaf (oak, hazel, hornbeam, lime, maple, elm) forest
-  **III.2b** Пологоволнистые ландшафты с лещиновыми и дубово-лещиновыми лесами, с примесью других лиственных пород (граба, ясеня, клена, липы, вяза, рябины и др.)
Gently undulating landscapes with hazel, hazel-oak forests with participation of other deciduous lime, hornbeam, elm and maple, with shrub undergrowth
-  **III.2c** Пологоволнистые ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод вблизи земной поверхности (менее 1 м), с черноольховыми фитоценозами и низинными болотами
Gently undulating landscapes with the groundwater occurring near the earth's surface (less than 1 m) with black alder phytocenoses and lowland bogs

IV ПЛОСКИЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ДЕНУДАЦИОННОЙ РАВНИНЕ, СЛОЖЕННОЙ ДОЧЕТВЕРТИЧНЫМИ (МЕЛОВЫМИ) ПОРОДАМИ FLAT FOREST LANDSCAPE ON A DENUDATION PLAIN CONSISTING OF PRE-QUATERNARY (CRETACEOUS) DEPOSITS

V ПЛОСКИЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ОЗЕРНО-ЛЕДНИКОВЫХ СУГЛИНКАХ И ГЛИНАХ FLAT FOREST LANDSCAPES ON THE LACUSTRINE-GLACIAL LOAMS AND CLAYS

-  **V.1** Плоские лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 2 м с дубово-ясеневыми лесами с примесью клена, липы, ольхи, осины, с подлеском из бузины, крушины, калины
Flat forest landscapes with a depth to the groundwater table less than 2 m, with oak-ash forests with an admixture of maple, lime, alder, aspen, with undergrowth of elder, buckthorn, viburnum
-  **V.2** Плоские лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 1 м с широколиственно-черноольховыми (дубово-ясенево-черноольховыми) лесами, с подлеском из крушины, калины и других кустарников, а также с верховыми и переходными болотами
Flat forest landscapes with a depth to the groundwater table less than 1 m, with broad-leaved (oak, ash and black alder) and black alder forests, with undergrowth of buckthorn, viburnum and other shrubs, and upland and transitional bogs

VI ПЛОСКИЕ И ПОЛОГОВОЛНИСТЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ОЗЕРНО-АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПЕСКАХ И СУПЕСЯХ FLAT AND GENTLY UNDULATING FOREST LANDSCAPES ON THE LACUSTRINE-ALLUVIAL SANDS AND SANDY LOAMS



VI.1 Плоские и пологоволнистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод более 1 м (менее 2 м) с дубовыми лесами с примесью ясеня, вяза, осины, ольхи, граба, лещины, с подлеском из крушины, бересклета и др.

Flat and gently undulating landscapes with a depth to the groundwater table more than 1 m (less than 2 m) with oak forests with an admixture of ash, elm, aspen, alder, hornbeam, hazel, with undergrowth of buckthorn, euonymus, etc.

VI.2 Плоские и пологоволнистые ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод менее 1 м с дубравами ольхово-пойменными, ясеневыми-черноольховыми и черноольховыми лесами и низинными болотами

Flat and gently undulating landscapes with a depth to the groundwater table less than 1 m, with oak forest alder-floodplain, ash and black alder, pure black alder forests with lowland bogs



VI.2a Плоские ландшафты с дубравами ольхово-пойменными, с подлеском из бересклета, крушины и др.

Flat landscapes with oak forest alder-floodplain, with undergrowth of euonymus, buckthorn, etc.



VI.2b Плоские и пологоволнистые ландшафты с ясеневыми-черноольховыми лесами с участием осины, ивы, с подлеском из кустарников, местами с низинными травянистыми болотами

Flat and gently undulating landscapes with ash and black alder forests with participation of aspen, willow, with shrub undergrowth, sometimes with lowland grassy bogs

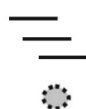


VI.2c Плоские ландшафты с залеганием грунтовых вод вблизи земной поверхности с черноольховыми лесами и низинными болотами

Flat landscapes with the groundwater occurring near the earth's surface with black alder forests and lowland bogs



VII ПЛОСКИЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПЕСКАХ И СУПЕСЯХ FLAT FOREST LANDSCAPES ON THE ALLUVIAL SANDS AND SANDY LOAMS



Заболоченность

Waterlogging

Озерные котловины

Lake basins

В составе лесов незначительную примесь местами составляли липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos* Scop.), липа серебристая (*T. tomentosa* Moench). Изредка могли произрастать клен платановидный (*Acer platanoides* L.), клен полевой (*A. campestre* L.), а также клен татарский (*A. tataricum* L.) – один из самых засухоустойчивых видов. Редкий подлесок создавали калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.), крушина ольховидная (*Frangula alnus* Mill.), бересклет европейский (*Euonymus europaea* L.).

Такие дубравы, по-видимому, могли иметь сходство с современными плакорными (суходольными) дубравами орляковыми (*Quercetum pteridiosum*), произрастающими на повышенных ровных или всхолмленных элементах рельефа [32].

1.16 Холмисто-грядовые лесные ландшафты с дубравами грабовыми с примесью липы, подлеском из лещины, калины, крушины, бирючины и др.

Рассматриваемые ландшафты распространены локально преимущественно в юго-западной и южной частях региона исследований. Леса представлены в основном дубравами грабовыми с редкой примесью липы сердцевидной (*Tilia cordata*), липы крупнолистной (*T. platyphyllos*) и липы серебристой (*T. tomentosa*); в их формировании заметное участие принимал граб обыкновенный (*Carpinus betulus* L.). Подлесок образовывали лещина обыкновенная (*Corylus avellana*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), крушина ольховидная (*Frangula alnus*), бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare* L.). Такие леса, возможно, были сходны с современными суходольными дубравами полесского типа [32], занимающими повышенные, всхолмленные участки рельефа, на что указывает несколько более высокое содержание пыльцы граба в западных разрезах.

1.1в Холмисто-грядовые лесные ландшафты со смешанными сосново-дубовыми лесами с участием липы, граба, лещины, бересклета и др.

Ландшафты были распространены в основном в пределах Минской возвышенности и локально на Новогрудской возвышенности, где занимали повышенные, всхолмленные местоположения. В состав древостоя входила сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Произрастали в основном сосново-дубовые леса, в которых главная роль принадлежала дубу черешчатому (*Quercus robur*), отмечались

дуб скальный (*Quercus petraea*) и дуб пушистый (*Quercus pubescens*). Присутствовала липа, представленная тремя видами: липой сердцевидной (*Tilia cordata*), липой крупнолистной (*T. platyphyllos*), липой серебристой (*T. tomentosa*), а также граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), лещина обыкновенная (*Corylus avellana*) и некоторые другие широколиственные породы. В подлеске встречался бересклет европейский (*Euonymus europaea*) и другие кустарники.

I.2 Грядово-увалистые и грядово-холмистые лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод выше 5 м с дубравами и дубравами грабовыми.

I.2a Грядово-увалистые ландшафты с дубравами, с заметной примесью липы, клена, лещины, рябины, подлеском из бересклета, калины, крушины и др.

Данный вид ландшафтов был распространен, главным образом, в пределах Новогрудской возвышенности, а также на склоновых участках Ошмянской и Минской возвышенностей, где произрастали преимущественно дубравы. Основную роль в них играл дуб черешчатый (*Quercus robur*), изредка встречались дуб скальный (*Q. petraea*), дуб пушистый (*Q. pubescens*), лещина обыкновенная (*Corylus avellana*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.). Заметную примесь создавали липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*), липа серебристая (*T. tomentosa*). Изредка встречались клен полевой (*Acer campestre*), клен платановидный (*A. platanoides*) и клен татарский (*A. tataricum*). Редкий подлесок создавали кустарники, в том числе бересклет европейский (*Euonymus europaea*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), крушина ольховидная (*Frangula alnus*) и др.

I.2b Грядово-увалистые и грядово-холмистые ландшафты с дубравами грабовыми, с участием клена, липы, лещины, рябины, подлеском из бересклета, крушины, калины и других кустарников.

Указанные ландшафты располагались преимущественно в южной части региона исследований. Лесная растительность была представлена дубравами грабовыми, в которых главную роль играл дуб, в основном дуб черешчатый (*Quercus robur*), реже присутствовали дуб скальный (*Q. petraea*) и дуб пушистый (*Q. pubescens*). Заметное участие в составе леса принимал граб обыкновенный (*Carpinus betulus*). Произрастали также липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*) и липа серебристая (*T. tomentosa*), клен платановидный (*Acer platanoides*) и клен полевой (*A. campestre*), реже – лещина обыкновенная (*Corylus avellana*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*). Подлесок создавали бересклет европейский (*Euonymus europaea*), крушина ольховидная (*Frangula alnus*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), свидина кроваво-красная (*Cornus sanguinea* L.).

II ПОЛОГОВОЛНИСТЫЕ, МЕСТАМИ ВОЛНИСТЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА МОРЕННЫХ СУПЕСЯХ И СУГЛИНКАХ (включают 2 вида и 6 подвидов).

На территории Центральной Беларуси рассмотренный род ландшафтов занимал довольно значительные территории в бассейнах крупных рек – Пра-Немана, Пра-Днепра и Пра-Сожа, приуроченные в основном к пологоволнистым моренным равнинам, в отличие от Полесского региона, где подобные ландшафты имели заметно меньшее распространение [1, 2].

II.1 Пологоволнистые, местами волнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод ниже 2 м с сосново-широколиственными, широколиственными дубовыми, липовыми, липово-дубовыми и дубово-липовыми лесами.

II.1a Пологоволнистые, местами волнистые лесные ландшафты с сосново-широколиственными (дуб, граб, липа, клен, лещина) лесами.

Эти ландшафты были распространены преимущественно на склонах конечно-моренных гряд Минской и Новогрудской возвышенностей. Произрастали сосново-широколиственные леса, в которых широколиственные породы были представлены преимущественно дубом черешчатым (*Quercus robur*), в меньшей степени – грабом обыкновенным (*Carpinus betulus*), липой сердцевидной (*Tilia cordata*), липой крупнолистной (*T. platyphyllos*) и липой серебристой (*T. tomentosa*), а также кленом платановидным (*Acer platanoides*), кленом полевым (*A. campestre*), кленом татарским (*A. tataricum*), лещиной обыкновенной (*Corylus avellana*).

II.1b Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с широколиственными, преимущественно дубовыми лесами со значительным участием граба, ясеня, клена, липы, вяза, лещины и обильным подлеском из бересклета, калины, крушины, бирючины.

Данные ландшафты были распространены в основном в пределах Волковысской и Слонимской равнин на западе территории исследований и Могилёвской равнины – на востоке. На почвах, подстилаемых супесями или суглинками, произрастали широколиственные, преимущественно дубовые леса, в составе которых главную роль играл дуб черешчатый (*Quercus robur*), реже присутствовали дуб скальный (*Q. petraea*) и дуб пушистый (*Q. pubescens*). Значительное участие в них принимали граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), клен платановидный (*Acer platanoides*), клен полевой (*A. campestre*) и клен татарский (*A. tataricum*), липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*) и липа серебристая (*T. tomentosa*), вяз гладкий (*Ulmus*

laevis Pall.), вяз полевой (*U. Minor* Mill.), лещина обыкновенная (*Corylus avellana*). Обильный подлесок создавали бересклет европейский (*Euonymus europaea*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), крушина ольховидная (*Frangula alnus*). В западной части региона произрастали также бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare*), плющ обыкновенный (*Hedera helix* L.), а на лиственных деревьях – омела белая (*Viscum album* L.). Состав лесов, вероятно, имел сходство с современными дубравами снытево-кисличными подтаежного типа, распространенными в центральной части Беларуси [32].

II.1в Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с широколиственными, преимущественно липовыми лесами, с небольшой примесью дуба, граба, вяза, клена, лещины, с калиной, черемухой, крушиной в подлеске.

Такие ландшафты выделены, главным образом, в пределах Столбцовой и Слуцкой равнин, а также локальными участками в центральной части территории исследований. На почвах, подстилаемых супесями или суглинками, в пределах повышенных достаточно увлажненных и хорошо дренированных участков произрастали широколиственные преимущественно липовые леса (липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*), реже – липа серебристая (*T. tomentosa*) со значительной примесью дуба черешчатого (*Quercus robur*), иногда дуба скального (*Q. petraea*) и дуба пушистого (*Q. pubescens*), граба обыкновенного (*Carpinus betulus*), вяза гладкого (*Ulmus laevis*), вяза полевого (*U. minor*), клена платановидного (*Acer platanoides*), клена полевого (*A. campestre*) и клена татарского (*A. tataricum*), лещины обыкновенной (*Corylus avellana*). На ветвях некоторых деревьев селилась омела белая (*Viscum album*). Подлесок создавали калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), крушина ольховидная (*Frangula alnus*).

II.1г Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с липово-дубовыми и дубово-липовыми лесами со значительным участием граба, вяза, клена, ясеня, лещины, ольхи, подлеском из крушины, бересклета, калины и др.

Данные ландшафты занимали обширные участки в северо-западной и восточной частях Центральной Беларуси. На почвах, подстилаемых супесями или суглинками, произрастали широколиственные, преимущественно липово-дубовые и дубово-липовые леса, в которых главную роль играли дуб черешчатый (*Quercus robur*), реже – дуб скальный (*Q. petraea*) и дуб пушистый (*Q. pubescens*) и липа (липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*), липа серебристая (*T. tomentosa*)). В состав этих лесов входили и такие лиственные породы, как вяз гладкий (*Ulmus laevis*), вяз полевой (*U. minor*), граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), клен платановидный (*Acer platanoides*), клен полевой (*A. campestre*) и клен татарский (*A. tataricum*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench), лещина обыкновенная (*Corylus avellana*). Обильный подлесок создавали крушина ольховидная (*Frangula alnus*), бересклет европейский (*Euonymus europaea*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*). На некоторых лиственных деревьях произрастала омела белая (*Viscum album*).

II.2 Пологоволнистые, местами волнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод менее 2 м с дубравами с примесью широколиственных пород и ольхи, с дубово-вязовыми с участием ясеня лесами.

II.2а Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с дубравами, с участием других широколиственных пород (ясеня, клена, граба, липы, лещины) и ольхи, с подлеском из бересклета, крушины, бирючины.

Ландшафты выделены преимущественно в пределах Лидской равнины. В пониженных и сырых местах в пределах моренных равнин могли произрастать дубравы (дуб черешчатый (*Quercus robur*), дуб скальный (*Q. petraea*) и дуб пушистый (*Q. pubescens*)), с небольшой примесью ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior*), клена платановидного (*Acer platanoides*) и полевого (*A. campestre*), граба обыкновенного (*Carpinus betulus*), липы сердцевидной (*Tilia cordata*) и липы крупнолистной (*T. platyphyllos*), лещины обыкновенной (*Corylus avellana*), ольхи серой (*Alnus incana*) и ольхи черной (*A. glutinosa* (L.) Gaertn), березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.). В подлеске присутствовали бересклет европейский (*Euonymus europaeus*), крушина ольховидная (*Frangula alnus*), а на западе в его состав входили также бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare*) и плющ обыкновенный (*Hedera helix*). Леса такого состава, вероятно, имели сходство с современными дубравами папоротниково-крапивными, произрастающими в регионе исследований на пониженных и ровных участках [32].

II.2б Пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с дубово-вязовыми лесами, с участием ясеня и небольшой примесью других широколиственных пород.

Данные ландшафты выделены в пределах пологоволнистых склонов моренных возвышенностей в верхнем и среднем течении Пра-Немана. Их заселяли дубово-вязовые леса с существенной ролью ясеня и примесью других широколиственных пород и ольхи. Преобладали вяз гладкий (*Ulmus laevis*), вяз полевой (*U. minor*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), произрастали граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), клен платановидный (*Acer platanoides*), клен по-

левой (*A. campestre*) и клен татарский (*A. tataricum*). Подлесок формировали бересклет европейский (*Euonymus europaeus*), крушина ольховидная (*Frangula alnus*) и другие кустарники. В наиболее увлажненных местах селились ольха черная (*Alnus glutinosa*) и ольха серая (*A. incana*).

III ПОЛОГОВОЛНИСТЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ФЛЮВИОГЛЯЦИАЛЬНЫХ РАЗНОЗЕРНИСТЫХ ПЕСКАХ (включают 2 вида и 5 подвидов).

Данный род ландшафтов имел наиболее широкое распространение в климатическом оптимуме муравинского межледниковья на территории как Центральной Беларуси, так и Белорусского Полесья [37, 38], занимая обширные участки флювиогляциальных равнин.

III.1 Пологоволнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод ниже 2 м с сосново-дубовыми и лещиново-дубовыми лесами.

III.1a Пологоволнистые ландшафты с хвойно-широколиственными, преимущественно сосново-дубовыми лесами с участием липы, граба, клена, вяза, лещины и др.

Ландшафты были распространены в пределах флювиогляциальных песчаных равнин, преимущественно примыкающих к Копыльской гряде, а также к Минской, Оршанской и Горецко-Мстиславской возвышенностям. Здесь произрастали смешанные хвойно-широколиственные, главным образом, сосново-дубовые леса с примесью граба обыкновенного (*Carpinus betulus*), липы сердцевидной (*Tilia cordata*), липы крупнолистной (*T. platyphyllos*) и липы серебристой (*T. tomentosa*), клена платановидного (*Acer platanoides*), клена полевого (*A. campestre*) и клена татарского (*A. tataricum*), вяза гладкого (*Ulmus laevis*), вяза полевого (*U. minor*), лещины обыкновенной (*Corylus avellana*), изредка – лещины древовидной (*C. colurna*) и других древесных пород.

III.1b Пологоволнистые ландшафты с широколиственными, преимущественно лещиново-дубовыми лесами, с участием липы, граба, вяза и клена, с кустарниками в подлеске.

Данные ландшафты занимали обширные участки по всей территории исследований, где были приурочены к наиболее возвышенным элементам рельефа в пределах флювиогляциальных песчаных равнин с хорошо дренированными, в меру увлажненными почвами. Здесь произрастали широколиственные, преимущественно лещиново-дубовые леса, в которых преобладал дуб черешчатый (*Quercus robur*), реже встречались дуб скальный (*Q. petraea*) и дуб пушистый (*Q. pubescens*). Существенное участие в составе лесной растительности принимала лещина обыкновенная (*Corylus avellana*), изредка – лещина древовидная (*C. colurna*). Реже произрастали граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), вяз гладкий (*Ulmus laevis*), вяз полевой (*U. minor*), липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*), липа серебристая (*T. tomentosa*), клен татарский (*Acer tataricum*), клен платановидный (*A. platanoides*) и клен полевой (*A. campestre*). В подлеске присутствовали бересклет европейский (*Euonymus europaeus*), свидина кроваво-красная (*Cornus sanguinea*) и другие кустарники. В крайних западных районах в составе лесной растительности изредка принимали участие плющ обыкновенный (*Hedera helix*) и омела белая (*Viscum album*). По берегам рек могли произрастать ольха серая (*Alnus incana*) и ольха черная (*A. glutinosa*).

III.2 Пологоволнистые лесные ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод выше 2 м с сосново-широколиственными, лещиновыми и дубово-лещиновыми лесами, а также с черноольховыми фитоценозами и низинными болотами.

III.2a Пологоволнистые ландшафты с сосново-широколиственными (дуб, лещина, граб, липа, клен, вяз) лесами.

Эти ландшафты располагались к югу от Копыльской гряды, а также на северных склонах Минской возвышенности, где произрастали смешанные сосново-широколиственные леса с преобладающей ролью дуба черешчатого (*Quercus robur*) и лещины обыкновенной (*Corylus avellana*), изредка – лещины древовидной (*C. colurna*), примесью граба обыкновенного (*Carpinus betulus*), липы сердцевидной (*Tilia cordata*), липы крупнолистной (*T. platyphyllos*) и липы серебристой (*T. tomentosa*), клена платановидного (*Acer platanoides*), клена полевого (*A. campestre*) и клена татарского (*A. tataricum*), реже – вяза гладкого (*Ulmus laevis*) и вяза полевого (*U. minor*). В составе подлеска присутствовали крушина ольховидная (*Frangula alnus*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), бересклет европейский (*Euonymus europaeus*) и другие кустарниковые породы.

III.2b Пологоволнистые ландшафты с лещиновыми и дубово-лещиновыми лесами, с примесью других лиственных пород (граб, ясеня, клена, липы, вяза и др.).

Такие ландшафты были наиболее широко распространены на всей территории Центральной Беларуси в пределах флювиогляциальных песчаных равнин. Здесь произрастали преимущественно лещиновые и дубово-лещиновые леса, в которых основным эдификатором была лещина обыкновенная (*Corylus avellana*), которая хорошо произрастает как при умеренном, так и при повышенном увлажнении почв (исключая застой воды и заболачивание). Изредка встречались лещина древовидная (*C. colurna*), а также дуб черешчатый (*Quercus robur*) и дуб скальный (*Q. petraea*), хорошо произрастающий на песчаных почвах [39]. В составе этих лесов присутствовали и другие древесные по-

роды: граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), клен платановидный (*Acer platanoides*), клен полевой (*A. campestre*) и клен татарский (*A. tataricum*), липа сердцевидная (*Tilia cordata*), липа крупнолистная (*T. platyphyllos*) и липа серебристая (*T. tomentosa*), вяз гладкий (*Ulmus laevis*), вяз полевой (*U. minor*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), бересклет европейский (*Euonymus europaeus*) и др. В западных районах в составе лесов присутствовали плющ обыкновенный (*Hedera helix*) и омела белая (*Viscum album*).

III.2в Пологоволнистые ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод вблизи земной поверхности (менее 1 м) с черноольховыми фитоценозами и низинными болотами.

Ландшафты были распространены локально по всей территории исследований, где были приурочены к наиболее низким пологоволнистым формам рельефа, сложенным флювиогляциальными песками с высоким уровнем залегания грунтовых вод. Несколько чаще такие ландшафты были представлены в западной части территории, где тяготели к долине Пра-Немана. Здесь же на обводненных участках низинных болот с достаточной проточностью почвенно-грунтовых вод были распространены черноольховые (*Alnus glutinosa*) фитоценозы с редкой примесью ивы (*Salix*) и березы пушистой (*Betula pubescens*).

IV ПЛОСКИЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ДЕНУДАЦИОННОЙ РАВНИНЕ, СЛОЖЕННОЙ ДО-ЧЕТВЕРТИЧНЫМИ (МЕЛОВЫМИ) ПОРОДАМИ.

Этот род ландшафтов имел ограниченное распространение на территории исследований и занимал, по-видимому, лишь небольшую площадь в пределах Минской возвышенности. На выходах меловых пород, где глубина залегания грунтовых вод составляла более 2 м, вероятно, произрастали дубовые леса с заметным участием дуба пушистого (*Quercus pubescens*), предпочитающего преимущественно карбонатные почвы и образующего ксерофитные редколесья. Здесь же могли селиться дуб черешчатый (*Q. robur*), дуб скальный (*Q. petraea*), граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), лещина обыкновенная (*Corylus avellana*) и другие породы.

V ПЛОСКИЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ОЗЕРНО-ЛЕДНИКОВЫХ СУГЛИНКАХ И ГЛИНАХ (включают 2 вида).

Данный род ландшафтов не имел широкого распространения в регионе исследований, однако занимал несколько большие площади, чем на территории Белорусского Полесья [1, 2]. Наиболее обширные участки были приурочены к бассейну Пра-Немана.

V.1 Плоские лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 2 м с дубово-ясеневыми лесами с примесью клена, липы, ольхи, осины, с подлеском из бузины, крушины, калины и др.

Такие ландшафты на суглинистых и глинистых почвах имели очень незначительное распространение в северной и южной частях региона исследований, где занимали сравнительно ровные участки рельефа. Здесь произрастали широколиственные дубово-ясеневые леса с доминирующей ролью ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior*), заметным участием дуба черешчатого (*Quercus robur*), примесью клена платановидного (*Acer platanoides*) и клена полевого (*A. campestre*), липы сердцевидной (*Tilia cordata*) и липы крупнолистной (*T. platyphyllos*), липы серебристой (*T. tomentosa*), ольхи черной (*Alnus glutinosa*), осины (*Populus tremula* L.), с подлеском из бузины обыкновенной (*Sambucus racemosa* L.), крушины ольховидной (*Frangula alnus*), калины обыкновенной (*Viburnum opulus*), ивы (*Salix*) и других кустарников.

V.2 Плоские лесные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 1 м с широколиственно-черноольховыми (дубово-ясенево-черноольховыми) лесами с подлеском из крушины, калины и других кустарников, а также с верховыми и переходными болотами.

Указанные ландшафты были приурочены преимущественно к западной части исследуемого региона и занимали центральную часть Неманской низменности, где на глинистых и суглинистых сырых и мокрых почвах произрастали широколиственно-черноольховые (дубово-ясенево-черноольховые) леса. В их составе преобладали ольха черная (*Alnus glutinosa*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), присутствовали осина (*Populus tremula*), липа сердцевидная (*Tilia cordata*), клен платановидный (*Acer platanoides*) и клен полевой (*A. campestre*), вяз гладкий (*Ulmus laevis*), граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), изредка – береза пушистая (*Betula pubescens*) и рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*). В состав подлеска входили крушина ольховидная (*Frangula alnus*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*), свидина кроваво-красная (*Cornus sanguinea*), бересклет европейский (*Euonymus europaea*) и др. Такие леса, возможно, были подобны современным широколиственно-черноольховым лесам Беларуси [32].

В пределах озерно-ледниковых равнин в пойме Пра-Немана могли существовать верховые болота с багульниковым болотным (*Ledum palustre* L.), вереском обыкновенным (*Calluna vulgaris* (L.) Hull), клюквой обыкновенной (*Vaccinium oxycoccos* L.), голубикой обыкновенной (*Vaccinium uliginosum* L.) и другими кустарничками типа современных осоково-сфагновых или кустарничково-пушицево-

сфагновых болот, а также болота переходные, на которых произрастали ольха черная (*Alnus glutinosa*) и изредка – береза пушистая (*Betula pubescens*), подобные нынешним кустарничково-травяно-осоково-сфагновым болотам [32].

VI ПЛОСКИЕ И ПОЛОГОВОЛНИСТЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА ОЗЕРНО-АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПЕСКАХ И СУПЕСЯХ (включают 2 вида и 3 подвида).

В регионе исследований, в отличие от территории Белорусского Полесья, где такие ландшафты занимали обширные площади в бассейнах крупных рек [1, 2], данный род ландшафтов имел локальное распространение, отдельные крупные участки были приурочены лишь к бассейну Пра-Немана.

VI.1 Плоские и пологоволнистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод более 1 м (менее 2 м) с дубовыми лесами с примесью ясеня, вяза, осины, ольхи, граба, лещины, с подлеском из крушины, бересклета и др.

Эти ландшафты были распространены локально по всей территории, где они сформировались в пределах озерно-аллювиальных низин на песчаных и супесчаных отложениях. Здесь произрастал дубовый лес с примесью ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior*), вяза гладкого (*Ulmus laevis*), вяза полевого (*U. minor*), осины (*Populus tremula*), ольхи серой (*Alnus incana*) и черной (*A. glutinosa*), граба обыкновенного (*Carpinus betulus*), лещины обыкновенной (*Corylus avellana*), реже – березы пушистой (*Betula pubescens*). В подлеске были представлены крушина ольховидная (*Frangula alnus*), свидина кроваво-красная (*Cornus sanguinea*), бересклет европейский (*Euonymus europaea*) и др. Такой лес имел сходство с современным дубняком ясенево-пойменным, занимающим самые высокие сравнительно ровные участки поймы, наиболее удаленные от русел рек [32].

VI.2 Плоские и пологоволнистые ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод менее 1 м с дубравами ольхово-пойменными, ясенево-черноольховыми и черноольховыми лесами и низинными болотами.

VI.2a Плоские ландшафты с дубравами ольхово-пойменными, с подлеском из бересклета, крушины и др.

Ландшафты были распространены в долине Пра-Немана в западной части Центральной Беларуси, а также локально по всей центральной части территории исследований, где были приурочены к плоским и пониженным участкам рельефа в пределах озерно-аллювиальных низин. Здесь могли развиваться фитоценозы дубравы ольхово-пойменной со значительным участием ольхи черной (*Alnus glutinosa*), примесью ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior*), осины (*Populus tremula*) и очень редко – березы пушистой (*Betula pubescens*). Подлесок состоял из бересклета европейского (*Euonymus europaea*), крушины ольховидной (*Frangula alnus*) и других кустарников.

VI.2b Плоские и пологоволнистые ландшафты с ясенево-черноольховыми лесами с участием осины, ивы, с подлеском из кустарников, местами с низинными травянистыми болотами.

Такие ландшафты имели заметное распространение в восточной части Неманской низменности, а также занимали незначительные, наиболее низкие и обильно увлажненные проточными водами участки в пределах озерно-аллювиальных низин. Растительность была представлена преимущественно черноольховыми лесами (*Alnus glutinosa*), в которых присутствовали ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), осина (*Populus tremula*), ива (*Salix*), калина обыкновенная (*Viburnum opulus*) и др. Местами существовали чистые черноольшаники и низинные травянистые болота.

VI.2в Плоские ландшафты с залеганием грунтовых вод вблизи земной поверхности с черноольховыми лесами и низинными болотами.

Эти ландшафты в климатическом оптимуме муравинского межледниковья не имели широкого распространения и были приурочены преимущественно к центральной части исследуемой территории. Здесь существовали низинные лесные болота, где произрастали черноольховые (*Alnus glutinosa*) леса, в которых были представлены изредка береза пушистая (*Betula pubescens*), разные виды ив (*Salix*), а из травянистых растений – осоки (*Cyperaceae* gen.) и злаки (*Poaceae* gen.). Среди споровых растений преобладали сфагновые мхи (*Sphagnum*), произрастали также щитовник болотный (*Dryopteris thelypteris* (L.) A. Gray), кочедыжник женский (*Athyrium filix-femina* (L.) Roth ex Mert.) и др. Такая растительность имела много общего с современной растительностью черноольховых и пушистоберезово-черноольховых травяно-осоковых лесов в сочетании с болотнопоротниковыми на низинных болотах, которая представлена черноольшаниками (осоковым, болотнопапоротниковым и ивняковым) [32].

VII ПЛОСКИЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ НА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПЕСКАХ И СУПЕСЯХ (включают 1 вид).

На территории Центральной Беларуси такие ландшафты были приурочены к долинам крупных рек, занимая незначительные площади, по сравнению с Полесским регионом, где они имели широкое распространение в основном южнее Пра-Припяти [2].

Плоские пойменные ландшафты с залеганием грунтовых вод вблизи земной поверхности, с черноольховыми лесами, местами разнотравно-осоковыми лугами и низинными болотами были распространены в приустьевых частях пойм Пра-Немана, Пра-Днепра, Пра-Сожа и Пра-Бережины и формировались в их наиболее низких и заболоченных участках. Здесь существовали монодоминантные черноольховые (*Alnus glutinosa*) леса с небольшой примесью ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior*), различными видами ив (*Salix*), с преобладанием осок (*Cyperaceae* gen.) и злаков (*Poaceae* gen.) среди травянистых растений, а также со сфагновыми мхами (*Sphagnum*).

Заключение. Таким образом, на основе геоморфологических, палинологических и геоботанических данных реконструированы ландшафты, существовавшие на территории Центральной Беларуси во время самой теплой фазы климатического оптимума муравинского межледникового. Как показали выполненные исследования, наибольшее распространение в то время имели пологоволнистые ландшафты в пределах флювиогляциальных равнин с лещиновыми и дубово-лещиновыми лесами. Значительные площади занимали также пологоволнистые, местами волнистые ландшафты с липово-дубовыми и дубово-липовыми лесами, произраставшими на моренных равнинах (низинах). Наиболее возвышенные и сухие участки рельефа, приуроченные к холмисто-грядовым краевым ледниковым образованиям, занимали суходольные дубравы и смешанные сосново-дубовые леса, несколько более увлажненные места заселяли дубравы с существенной примесью других широколиственных пород. На территориях с залеганием грунтовых вод вблизи земной поверхности произрастали черноольховые и ясенево-черноольховые леса.

Состав флоры и характер растительности самой теплой фазы климатического оптимума муравинского межледникового на территории Центральной Беларуси указывают на некоторые их региональные отличия, обусловленные усилением континентальности климата в направлении с запада на восток. Абсолютное господство широколиственных лесов и их богатый таксономический состав свидетельствуют о значительно более высоких летних и особенно зимних палеотемпературах [9] по сравнению с оптимумом голоцена [40], когда преобладали смешанные широколиственно-хвойные леса.

Список использованных источников

1. Матвеев, А. В. Ландшафты западной части Белорусского Полесья в климатическом оптимуме муравинского межледникового / А. В. Матвеев, Т. Б. Рылова // Природопользование. – 2018. – № 2. – С. 83–94.
2. Рылова, Т. Б. Ландшафты восточной части Белорусского Полесья в климатическом оптимуме муравинского межледникового / Т. Б. Рылова, А. В. Матвеев, А. В. Шидловская // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 64–76.
3. Цапенко, М. М. Антропогенные отложения Белоруссии / М. М. Цапенко, Н. А. Махнач. – Минск : АН БССР, 1959. – 225 с.
4. Флора и растительность Белоруссии в палеогеновое, неогеновое и антропогенное время / Н. А. Махнач [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1981. – 106 с.
5. Матвеев, А. В. Рельеф Белорусского Полесья / А. В. Матвеев, Б. Н. Гурский, Р. И. Левицкая. – Минск : Наука и техника, 1982. – 131 с.
6. Палеогеография кайнозоа Беларуси / под ред. А. В. Матвеева. – Минск : Институт геологических наук НАН Беларуси, 2002. – 164 с.
7. Геамарфалагічная карта М 1 : 1 250 000 / А. В. Мацвееў [і інш.] // Нацыянальны атлас Беларусі [Карты] / складзены і падрыхтаваны да друку РУП «Белкартаграфія» ў 2000–2002 гг. – [Маштабы розныя]. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – С. 66–67.
8. Матвеев, А. В. Палеорельеф территории Центральной Беларуси в муравинское межледниковье / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2023. – № 2 (59). – С. 47–52.
9. Рылова, Т. Б. Региональные особенности палиностратиграфии муравинских отложений, межледниковой растительности и климата на территории Центральной Беларуси / Т. Б. Рылова, А. В. Шидловская // Літасфера. – 2022. – № 2 (57). – С. 55–75.
10. Рылова, Т. Б. Развіццё вадаемаў і расліннасці ваколіц Гродна на працягу муравінскага міжледавікоўя / Т. Б. Рылова, Г. К. Хурсевіч // Даследаванні антрапагену Беларусі : зб. прац / пад рэд. У. А. Кузняцова. – Мінск : Навука і тэхніка, 1978. – С. 139–150.
11. Межрегиональная корреляция верхнеприпятьских (Upper Wartanian), муравинских (Eemian) и нижнепоозерских (Lower Wistulian) пыльцевых зон Беларуси и Польши / Т. Б. Рылова [и др.] // Літасфера. – 2008. – № 1 (28). – С. 64–75.
12. Неаплейстацэн і галацэн Ашмянскіх град (Стратыграфія і некаторыя асаблівасці гісторыі расліннасці Беларусі па матэрыялах вывучэння апорнага разрэзу Карачоўшчыны) / Л. М. Вазнячук [і інш.] // Даследаванні антрапагену Беларусі : зб. прац / пад рэд. У. А. Кузняцова. – Мінск : Навука і тэхніка, 1978. – С. 110–129.
13. Еловичева, Я. К. Заславль – опорный разрез муравинского межледникового Беларуси / Я. К. Еловичева, Е. Н. Дрозд. – Минск : БГУ, 2005. – 81 с. – Деп. в ГУ «БелИСА» 24.08.2005, № Д200558.

14. Новые данные комплексного исследования отложений верхнего плейстоцена в разрезе Заславль / А. К. Карабанов [и др.] // Актуальные проблемы наук о Земле. Геологические и географические исследования трансграничных регионов : сборник материалов Междунар. науч.-практ. семинара, Брест, 21–25 сент. 2015 г. / редкол.: А. К. Карабанов (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГУ, 2015. – С. 98–103.
15. Санько, А. Ф. Четвертичные отложения Логойской астроблемы / А. Ф. Санько, Т. Б. Рылова, Г. И. Литвинюк // Четвертичная геология, геоморфология, геоэкология Беларуси и сопредельных территорий : материалы Междунар. науч. семинара, посвящ. 80-летию со дня рожд. Л. Н. Вознячука / под ред. А. Ф. Санько. – Минск : Право и экономика, 2009. – С. 107–110.
16. Махнач, Н. А. Этапы развития растительности Белоруссии в антропогене / Н. А. Махнач. – Минск : Наука и техника, 1971. – 211 с.
17. Савченко, И. Е. Биостратиграфическое расчленение муравинских и нижнепоозерских отложений плейстоцена на территории Беларуси по палинологическим данным / И. Е. Савченко, Т. Б. Рылова // Доклады НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 2. – С. 93–99.
18. Санько, А. Ф. Цэнтральнабярэзінская раўніна ў неаплейстаэне (па матэрыялах вывучэння св. ТЛ-62 Чарнавошава) / А. Ф. Санько, І. Я. Саўчанка, С. У. Дзямідава // Праблемы палеагеаграфіі позняга плейстаэну і галацэну : матэрыялы бел.-польск. семинара, Гродна, 26–29 верас. 2000 г. / навук. рэд. А. В. Мацвееў [і інш.]. – Мінск, 2000. – С. 83–85.
19. Savchenko, I. Muravian (Eemian) and Early Poozerian (Early Weichselian) sequence at Azarichi section (Eastern Belarus) / I. Savchenko, I. Pavlovskaya // Acta Palaeobotanica. – 1999. – Suppl. 2. – P. 523–527.
20. Паўлоўская, І. Э. Позні плейстацэн на ўсходзе Беларусі / І. Э. Паўлоўская, Т. В. Якубоўская, І. Я. Саўчанка // Літасфера. – 2004. – № 1 (20). – С. 22–34.
21. Кондратене, О. П. Стратиграфия и палеогеография квартера Литвы по палеоботаническим данным / О. П. Кондратене. – Вильнюс : Академия, 1996. – 209 с.
22. Granoszewski, W. Late Pleistocene vegetation history and climatic changes at Horoszk Duże, Eastern Poland: a palaeobotanical study / W. Granoszewski // Acta Palaeobotanica. – 2003. – Suppl. 4. – P. 1–95.
23. Mamakowa, K. Late Middle Polish Glaciation, Eemian and Early Vistulian vegetation at Imbramowice near Wrocław and the pollen stratigraphy of this part of the Pleistocene in Poland / K. Mamakowa // Acta Palaeobotanica. – Warszawa ; Kraków, 1989. – Vol. 29, № 1. – 229 p.
24. Природные условия микулинского (земского) межледниковья в Центральной и Восточной Европе. Сравнительный анализ / А. А. Величко [и др.] // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. – 2004. – № 5. – С. 41–57.
25. Новенко, Е. Ю. Изменения растительности и климата Центральной и Восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене в межледниковые и переходные этапы климатических макроциклов / Е. Ю. Новенко. – М. : ГЕОС, 2016. – 228 с.
26. Еловичева, Я. К. Эволюция природной среды антропогена Беларуси (по палинологическим данным) / Я. К. Еловичева. – Минск : Белсэкс, 2001. – 292 с.
27. Еловичева, Я. К. Макросукцессии растительности муравинского (микулинского) межледниковья в пределах запада Восточно-Европейской равнины / Я. К. Еловичева, Н. М. Писарчук // Региональная физическая география в новом столетии (к 55-летию кафедры физической географии мира и образовательных технологий) : сб. науч. ст. / БГУ, географический фак., каф. физической географии мира и образовательных технологий ; БГПУ им. М. Танка, фак. естествознания ; под общ. ред. Я. К. Еловичевой. – Минск : БГУ, 2017. – Вып. 10. – С. 15–51.
28. Еловичева, Я. К. Новый разрез микулинского (муравинского) межледниковья в Брянской области России // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы I Междунар. науч. конф., Минск, 10–12 апр. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: О. В. Лукашёв (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2020. – С. 268–274.
29. Лийвранд, Э. Д. Методические проблемы палинostrатиграфии плейстоцена / Э. Д. Лийвранд. – Таллинн : Валгус, 1990. – 176 с.
30. Биология древесных растений / под ред. А. Ф. Иванова. – Минск : Наука и техника, 1975. – 260 с.
31. Ellenberg, H. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5. Aufl. Ulmer. – Stuttgart, 1996. – 1096 s.
32. Юркевич, И. Д. Растительность Белоруссии, ее формирование, охрана и использование (с «Картой растительности Белорусской ССР» масштаба 1 : 600 000) / И. Д. Юркевич, Д. С. Голод, В. С. Адериho. – Минск : Наука и техника, 1979. – 248 с.
33. Расліннасць. М 1 : 250 000 / В. І. Парфёнаў [і інш.] // Нацыянальны Атлас Беларусі [Карты] / складзены і падрыхтаваны да друку РУП «Белкартаграфія» ў 2000–2002 гг. – [Маштабы розныя]. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – С. 114–115.
34. Ландшафты. М 1 : 250 000 / Г. І. Марцынкевіч [і інш.] // Нацыянальны Атлас Беларусі Беларусі [Карты] / складзены і падрыхтаваны да друку РУП «Белкартаграфія» ў 2000–2002 гг. – [Маштабы розныя]. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – С. 144–145.
35. Марцынкевич, Г. И. Ландшафтоведение : учеб. пособие / Г. И. Марцынкевич, И. И. Счастливая. – Минск : БГУ, 2013. – 252 с.
36. Природа Беларуси на рубеже тысячелетий / В. М. Байчоров [и др.] ; редкол.: А. А. Коваленя [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 367 с.
37. Рылова, Т. Б. Растительность и климат территории западной части Белорусского Полесья в муравинское межледниковье / Т. Б. Рылова, И. Е. Савченко // Літасфера. – 2018. – № 2 (49). – С. 17–32.

38. Рылова, Т. Б. Растительность и климат территории восточной части Белорусского Полесья в муравинское межледниковье / Т. Б. Рылова // Літасфера. – 2020. – № 1 (52). – С. 89–104.
39. Попа, Ю. Н. Сохранение и использование дуба скального / Ю. Н. Попа // Лесоводство, лесоведение, лесные пользования. Обзорная информация. – М. : ВНИИЦлесресурс, 1990. – Вып. 2. – 28 с.
40. Зерницкая, В. П. Позднеледниковье и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат / В. П. Зерницкая. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 303 с.

References

1. Matveyev A. V., Rylova T. B. *Landshafty zapadnoy chasti Belorusskogo Poles'ya v klimaticheskoy optimume muravinskogo mezhljedniov'ya* [Landscapes of the western part of Belarusian Polesie in the climatic optimum of the Muravian interglacial]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2018, no. 2, pp. 83–94 (in Russian)
2. Rylova T. B., Matveyev A. V., Shidlovskaya A. V. *Landshafty vostochnoy chasti Belorusskogo Poles'ya v klimaticheskoy optimume muravinskogo mezhljedniov'ya* [Landscapes of the eastern part of the Belarusian Polesie in the climatic optimum of the Muravian interglacial]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2020, no. 2, pp. 64–76 (in Russian)
3. Tsapenko M. M., Makhnach N. A. *Antropogennyye otlozheniya Belorussii* [Anthropogenic sediments of Belarus]. Minsk, Academy of Sciences of BSSR Publ., 1959, 225 p. (in Russian)
4. Makhnach N. A., Yelovicheva Yu. K., Burlak A. F., Rylova T. B. *Flora i rastitel'nost' Belorussii v paleogenovoye, neogenovoye i antropogennoye vremya* [Flora and vegetation of Belarus in Paleogene, Neogene and Anthropogene]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1981, 106 p. (in Russian)
5. Matveyev A. V., Gurskiy B. N., Levitskaya R. I. *Rel'yef Belorusskogo Poles'ya* [Relief of the Belarusian Polesie]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1982, 131 p. (in Russian)
6. *Paleogeografiya kaynozoya Belarusi* [Cenozoic paleogeography of Belarus]. Ed. by A. V. Matveyev. Minsk, Institute of Geological Sciences of NAS of Belarus Publ., 2002, 164 p. (in Russian)
7. *Hieamarfalahichnaya karta* [Geomorphological map] 1 : 1,250,000. *Nacyjanalny atlas Bielarusi [Karty] = National Atlas of Belarus [maps]*. Minsk, Belkartahtafija Publ., 2002, pp. 66–67 (in Belarusian).
8. Matveyev A. V. *Paleorel'yef territorii Tsentral'noy Belarusi v muravinskoye mezhljedniov'ye* [Paleorelief of the territory of Central Belarus during the Muravian interglacial]. *Litasfera = Lithosphere*, 2023, no. 2 (59), pp. 47–52 (in Russian)
9. Rylova T. B., Shidlovskaya A. V. *Regional'nyye osobennosti palinostratigrafii muravinskih otlozheniy, mezhljedniovoy rastitel'nosti i klimata na territorii Tsentral'noy Belarusi* [Regional features of the palinostratigraphy of the Muravin deposits, interglacial vegetation and climate in the territory of Central Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2022, no. 2 (57), pp. 55–75 (in Russian)
10. Rylova T. B., Chursievich H. K. *Razviciye vadajemaj i raslinnasci vakolic Hrodna na praciachu muravinskaha mižljudavikoŭja* [Development of reservoirs and vegetation in the vicinity of Grodno during the Muravian interglacial period]. *Dasliedavanni antrapahieny Belarusi: zb. prac* [Anthropogenic studies of Belarus: collection of works]. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ., 1978, pp. 139–150 (in Belarusian).
11. Rylova T. B., Savchenko I. E., Granoshevskiy V., Vinter H. *Mezhregional'naya korrelyatsiya verkhnepripyatskikh (Upper Wartanian), muravinskih (Eemian) i nizhnepoozerskikh (Lower Wistulian) pyl'tsevykh zon Belarusi i Pol'shi* [Interregional correlation of the Upper Pripyat (Upper Wartanian), Muravian (Eemian) and Lower Wistulian pollen zones of Belarus and Poland]. *Litasfera = Lithosphere*, 2008, no. 1 (28), pp. 64–75 (in Russian)
12. Vazniačuk L. M., Machnač, N. A., Runiec Ja. P., Puzanaŭ L. C., Arslanaŭ H. A. *Nieapliejstacen i halacen Ašmianskich hrad (Stratyhrafija i niekatoryja asablivasci historyi raslinnasci Belarusi pa materyjalach vyučennia aporaha razrezu Karačoŭščyna)* [Neopleistocene and Holocene of Ashmyany ridges (Stratigraphy and some features of the vegetation history of Belarus based on the materials of the study of the Karachouhshchyna reference section)]. *Dasliedavanni antrapahieny Belarusi: zb. prac* [collection of works "Anthropogenic studies of Belarus"]. Ed. by U. A. Kuznyatsou. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ., 1978, pp. 110–129 (in Belarusian)
13. Yelovicheva Yu. K., Drozd E. N. *Zaslavl' – oporny razrez muravinskogo mezhljedniov'ya Belarusi* [Zaslavl' – reference section of the Muravian interglacial of Belarus]. Minsk, BSU Publ., 2005, 81 p. (in Russian)
14. Karabanov A. K., Rylova T. B., Šeiriėnė V., Baltrūnas V., Katinas V., Karmaza B., Litvinyuk H. I. *Novyye dannyye kompleksnogo issledovaniya otlozheniy verkhnego pleystotsena v razreze Zaslavl'* [New data from a comprehensive study of Upper Pleistocene deposits in the Zaslavl' section]. *Aktual'nyye problemy nauk o Zemle. Geologicheskiye i geograficheskiye issledovaniya transgraničnykh regionov : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. seminar, Brest, 21–25 sent. 2015 g.* [Proc. of the Int. sci. and pract. seminar "Current problems of Earth sciences. Geological and geographical studies of transboundary regions", Brest, September 21–25, 2015]. Brest, BrSU Publ., 2015, pp. 98–103 (in Russian)
15. San'ko A. F., Rylova T. B., Litvinyuk G. I. *Chetvertichnyye otlozheniya Logoyskoy astroblemy* [Quaternary deposits of the Logoisk astrobleme]. *Chetvertichnaya geologiya, geomorfologiya, geoekologiya Belarusi i sopredel'nykh territoriy : materialy mezhdunar. nauch. seminar, posvyashch. 80-letiyu so dnya rozhd. L. N. Voznyachuka* [Proc. of the int. sci. seminar to 80th birthday of L. N. Voznyachuk "Quaternary geology, geomorphology, geo-ecology of Belarus and adjacent territories"]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 2009, pp. 107–110 (in Russian)
16. Makhnach N. A. *Etapy razvitiya rastitel'nosti Belorussii v antropogene* [Stages of vegetation development of Belarus in the anthropogene]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1971, 211 p. (in Russian)

17. Savchenko I. E., Rylova T. B. *Biostratigraficheskoye raschleneniye muravinskikh i nizhnepoozerskikh otlozheniy pleystotsena na territorii Belarusi po palinologicheskim dannym* [Biostratigraphic subdivision of the Muravian and Lower Poozerian deposits of the Pleistocene on the territory of Belarus according to palynological data]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of the NAS of Belarus*, 2001, vol. 45, no. 2, pp. 93–99 (in Russian)
18. Sanko A. F., Saŭčanka I. Ja., Dziamidava S. U. *Centralnabiarezinskaja raŭnina ŭ nieapliejstacenie (pa mater'yalach vyvučennia sv. TL-62 Čarnavosava)* [Center Berezina Plain in the Neopleistocene (based on the study materials of borehole TL-62 Charnavosava)]. *Prablomy palieahieahrafii pozniaha pliejstacenu i halacenu: materyjaly biel.-połsk. Sieminara* [Proc. of Belarusian-Polish seminar "Problems of paleogeography of the late Pleistocene and Holocene"]. Minsk, 2000, pp. 83–85 (in Belarusian)
19. Savchenko I., Pavlovskaya I. Muravian (Eemian) and Early Poozerian (Early Weichselian) sequence at Azarichi section (Eastern Belarus). *Acta Palaeobotanica*, 1999, Suppl. 2, pp. 523–527.
20. Paŭloŭskaja I. E., Jakuboŭskaja T. V., Saŭčanka I. Ja. *Pozni pliejstacen na ŭschodzie Bielarusi* [Late Pleistocene in eastern Belarus]. *Litasfiera = Lythosphere*, 2004, no. 1 (20), pp. 22–34 (in Belarusian)
21. Kondratienė O. P. *Stratigrafiya i paleogeografiya kvartera Litvy po paleobotanicheskim dannym* [Stratigraphy and paleogeography of the Quaternary of Lithuania according to paleobotanical data]. Vilnius, Akademiya Publ., 1996, 209 p. (in Russian)
22. Granoszewski W. Late Pleistocene vegetation history and climatic changes at Horoszki Duże, Eastern Poland: a palaeobotanical study. *Acta Palaeobotanica*, 2003, Suppl. 4, pp. 1–95.
23. Mamakowa K. Late Middle Polish Glaciation, Eemian and Early Vistulian vegetation at Imbramowice near Wrocław and the pollen stratigraphy of this part of the Pleistocene in Poland. *Acta Palaeobotanica*, Warszawa-Kraków, 1989, vol. 29, no. 1, 229 p.
24. Velichko A. A., Novenko E. Yu., Zelikson E. M., Pisareva V. V., Kosmakova A. V., Böttger T. V., Yunge F. V. *Prirodnyye usloviya mikulinskogo (eyemskogo) mezhdnikov'ya v Tsentral'noy i Vostochnoy Yevrope. Sravnitel'nyy analiz* [Natural conditions of the Mikulian (Eemian) interglacial in Central and Eastern Europe. Comparative analysis]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Ser. geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series Geography*, 2004, no. 5, pp. 41–57 (in Russian)
25. Novenko E. Yu. *Izmeneniya rastitel'nosti i klimata Tsentral'noy i Vostochnoy Yevropy v pozdnem pleystotsene i golotsene v mezhdnikovyye i perekhodnyye etapy klimaticheskikh makrotsiklov* [Changes in vegetation and climate of Central and Eastern Europe in the late Pleistocene and Holocene during interglacial and transitional stages of climatic macrocycles]. Moscow, GEOS Publ., 2016, 228 p. (in Russian)
26. Yelovicheva Ya. K. *Evolutsiya prirodnoy sredy antropogena Belarusi (po palinologicheskim dannym)* [Evolution of the natural environment of the anthropogene of Belarus (according to palynological data)]. Minsk, Belsens Publ., 2001, 292 p. (in Russian)
27. Yelovicheva Ya. K., Pisarchuk N. M. *Makrosuktsessii rastitel'nosti muravinskogo (mikulinskogo) mezhdnikov'ya v predelakh zapada Vostochno-Yevropeyskoy ravniny* [Macro-succession of vegetation of the Muravian (Mikulian) interglacial within the western East European Plain]. *Regional'naya fizicheskaya geografiya v novom stoletii (k 55-letiyu kafedry fizicheskoy geografii mira i obrazovatel'nykh tekhnologiy): sb. nauch. st.* [Proc. to the 55th anniversary of the department of world physical geography and educational technologies "Regional physical geography in the new century"]. Minsk, BSU Publ., 2017, pp. 15–51 (in Russian)
28. Yelovicheva Ya. K. *Novyy razrez mikulinskogo (muravinskogo) mezhdnikov'ya v Bryanskoy oblasti Rossii* [New section of the Mikulian (Muravian) interglacial in the Bryansk region of Russia]. *Problemy regional'noy geologii zapada Vostochno-Yevropeyskoy platformy i smezhnykh territoriy: materialy I Mezhdunar. nauch. konf.* [Proc. of the I Int. sci. conf. "Problems of regional geology of the west of the East European Platform and adjacent territories"]. Minsk, BSU Publ., 2020, pp. 268–274 (in Russian)
29. Liyvrand E. D. *Metodicheskiye problemy palinostratigrafii pleystotsena* [Methodological problems of Pleistocene palinostratigraphy]. Tallinn, Valgus Publ., 1990, 176 p. (in Russian)
30. *Biologiya drevesnykh rasteniy* [Biology of tree plants]. Ed. by A. F. Ivanov. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975, 260 p. (in Russian)
31. Ellenberg H. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 5. Aufl. Ulmer. Stuttgart, 1996. 1096 s.
32. Yurkevich I. D., Golod D. S., Aderikho V. S. *Rastitel'nost' Belorussii, yeye formirovaniye, okhrana i ispol'zovaniye (s "Kartoy rastitel'nosti Belorusskoy SSR" masshtaba 1 : 600 000)* [Vegetation of Belarus, its formation, protection and usage (with the "Vegetation Map of the Belarusian SSR" 1 : 600,000)]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1979, 248 p. (in Russian)
33. *Raslinnasć* [Vegetation]. 1 : 250,000. *Nacyjannaŭny atlas Bielarusi [Karty] = National Atlas of Belarus [maps]*. Minsk, Belkartahrafija Publ., 2002, pp. 114–115 (in Belarusian).
34. *Landšafty* [Landscapes]. 1 : 250,000. *Nacyjannaŭny atlas Bielarusi [Karty] = National Atlas of Belarus [maps]*. Minsk, Belkartahrafija Publ., 2002, pp. 144–145 (in Belarusian).
35. Martsinkevich G. I., Schastnaya I. I. *Landshaftovedeniye: uchebnoye posobiye* [Landscape science]. Minsk, BSU Publ., 2013, 252 p. (in Russian)
36. *Priroda Belarusi na rubezhe tysyacheletiy* [Nature of Belarus at the turn of the millennium]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2020, 367 p. (in Russian)
37. Rylova T. B., Savchenko I. E. *Rastitel'nost' i klimat territorii zapadnoy chasti Belorusskogo Poles'ya v muravinskoye mezhdnikov'ye* [Vegetation and climate of the territory of the western part of the Belarusian Polesie during the Muravian interglacial]. *Litasfiera = Lythosphere*, 2018, no. 2 (49), pp. 17–32 (in Russian)

38. Rylova T. B. *Rastitel'nost' i klimat territorii vostochnoy chasti Belorusskogo Poles'ya v muravinskoye mezhljedniki-
kov'ye* [Vegetation and climate of the territory of the eastern part of the Belarusian Polesie during the Muravian in-
terglacial]. *Litasfera = Lythospere*, 2020, no. 1 (52), pp. 89–104 (in Russian)
39. Popa Yu. N. *Sokhraneniye i ispol'zovaniye duba skal'nogo* [Conservation and use of sessile oak]. *Lesovodstvo, lesovedeniye, lesnyye pol'zovaniya. Obzornaya informatsiya = Forestry, forest science, forest use. Overview in-
formation*. Moscow, VNIITSlesresurs Publ., 1990, vol. 2, 28 p. (in Russian)
40. Zernitskaya V. P. *Pozdnelednikov'ye i golotsen Belarusi: geokhronologiya, osadkonakopleniye, rastitel'nost' i klimat* [Late glacial and holocene of Belarus: geochronology, sedimentation, vegetation and climate]. Minsk, Bel-
aruskaya Navuka Publ., 2022, 303 p. (in Russian)

Информация об авторах

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

Рылова Татьяна Борисовна – доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: rylova_tatyata18@mail.ru

Шидловская Анна Валерьевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anne.shidlovskaya@gmail.com

Information about the authors

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

Tatyana B. Rylova – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Assistant Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: rylova_tatyata18@mail.ru

Anna V. Shidlovskaya – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anne.shidlovskaya@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-113-125>
УДК 556.3(476.6)

Поступила в редакцию 16.04.2024
Received 16.04.2024

ЧИСЛЕННАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕЖДУРЕЧЬЯ ВИЛИЯ – ГОЗОВКА (РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)

В. Г. Жогло

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Создана численная геофильтрационная модель (ЧГФМ) подземных вод территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка. В центре моделируемой области расположен ядерно-энергетический комплекс Белорусской АЭС (БелАЭС). На модели воспроизведены грунтовый (1-й от поверхности) водоносный горизонт, днепровский-сожский и березинский-днепровский водно-ледниковые комплексы, водоносный бринеvский терригенный горизонт и объединенный силурийский-девонский водоносный комплекс, разделяющие их слабопроницаемые слои, рельеф и речная сеть. ЧГФМ объекта реализована на базе программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (г. Москва). На созданной модели выполнено моделирование фильтрации подземных вод в стационарной постановке. По результатам моделирования оценены естественные ресурсы подземных вод с их расчленением на подземный сток в реки и разгрузку грунтовых вод (ГВ) испарением; установлена структура водного баланса подземных и поверхностных вод; построены карты интенсивности инфильтрационного питания ГВ и интенсивности водообмена между днепровским-сожским водно-ледниковым комплексом и грунтовым водоносным горизонтом. Созданная ЧГФМ является геофильтрационной основой для численного моделирования миграции подземных вод в районе БелАЭС.

Ключевые слова: Островец; подземные воды; геофильтрация; инфильтрационное питание; водный баланс; численное моделирование; коэффициент регуляризации.

Для цитирования. Жогло В. Г. Численная геофильтрационная модель подземных вод междуречья Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 113–125.

NUMERICAL GEOFILTRATION MODEL OF UNDERGROUND WATER OF THE VILIA – GOZOVKA INTERFLUVE (REPUBLIC OF BELARUS)

V. G. Zhoglo

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

Abstract. A numerical geofiltration model (NGFM) of underground water in the area bounded by the Vilia, Oshmyanka, Losha and Gozovka rivers has been developed. The nuclear power complex of the Belarusian Nuclear Power Plant (Belarusian NPP) is located in the centre of the modelled area. The model reproduces the groundwater, Dnieper-Sozh, Berezina-Dnieper, Brinevsky, and Silurian-Devonian aquifers, as well as their separating low-permeability layers, relief, and river network. The NGFM of the object is implemented based on ModTech software by Geolink (Moscow). The created model simulates the filtration of underground water in stationary setting. Based on the simulation results, natural water resources are evaluated with their breakdown into underground water runoff into rivers and groundwater discharge through evaporation. The structure of the water balance of underground and surface waters is established, and the maps of the intensity of groundwater infiltration feeding and water exchange between the Dnieper-Sozh and groundwater aquifers are constructed. The created NGFM serves as geofiltration basis for numerical modelling of groundwater migration in the area of Belarusian NPP.

Keywords: Ostrovets; underground water; geofiltration; infiltration feeding; water balance; numerical modelling; regularization coefficient.

For citation. Zhoglo V. G. Numerical geofiltration model of underground water of the Vilia – Gozovka interfluve (Republic of Belarus). *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 113–125.

Введение. Мировой опыт свидетельствует о том, что эксплуатация атомных электростанций (АЭС) оказывает негативное влияние на радиационное состояние подземных вод. В качестве одного из последних примеров является АЭС «Фукусима» в Японии, где радиоактивное загрязнение ГВ приобрело большие масштабы и рассматривается в качестве одного из серьезных последствий произошедшей аварии.

Случаи загрязнения подземных вод неоднократно фиксировались также на станциях, работавших в штатном режиме, в России, США и других странах. Согласно «Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 02.06.2015 № 460, существует объективная необходимость создания пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) для обеспечения безопасной изоляции эксплуатационных радиоактивных отходов (РАО) Белорусской АЭС (БелАЭС) разных категорий. Строительство ПЗРО целесообразно осуществить с использованием приповерхностного способа локализации отходов [1].

Согласно оценкам ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси, на конкурирующих площадках для размещения ПЗРО БелАЭС зона аэрации не может исключить возможность поступления радионуклидов в ГВ в опасных концентрациях при отсутствии или разрушении инженерных барьеров. Расчеты показали, что уровня ГВ могут достичь 15 из 36 радионуклидов, рассмотренных в предварительном составе РАО. Причем наиболее опасными из них являются радионуклиды, слабо сорбируемые грунтами зоны аэрации и грунтового водоносного горизонта (^3H , ^{133}Ba , ^{14}C , ^{239}Pu , ^{36}Cl , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{234}U), т. е. имеют значения сорбционных характеристик в грунтах (K_d), близкие к нулю [2, 3].

Достигнув уровня ГВ, радионуклиды будут переноситься потоком подземных вод к областям их разгрузки (реки, озера, родники) и к источникам хозяйственно-питьевого водоснабжения (водозаборы подземных вод, трубчатые колодцы в сельских населенных пунктах и дачных поселках). В связи с этим уже на стадии выбора мест размещения ПЗРО необходим долгосрочный прогноз миграции радионуклидов в подземных водах.

Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические данные по району строительства БелАЭС, полученные в предыдущие годы, в совокупности с результатами мониторинга подземных вод, проводившегося на стадии строительства, дают возможность создать детальные численные геофильтрационную и геомиграционную модели подземных вод территории размещения ПЗРО.

Цель работы – создать численную геофильтрационную модель (ЧГФМ) междуречья Вилия – Гозовка в качестве геофильтрационной основы численного моделирования потенциальной миграции радионуклидов на участке размещения ПЗРО. По результатам численного моделирования фильтрации грунтовых и межпластовых вод должны быть установлены пространственная структура геофильтрационного потока и интенсивность инфильтрационного водообмена, т. е. направления и скорости фильтрации подземных вод и межпластовые перетоки.

Материалы и методы исследования. Информационную основу ЧГФМ междуречья Вилия – Гозовка представляют материалы по геолого-гидрогеологическим условиям Островецкого региона, полученные в процессе научного сопровождения работ по обоснованию строительства БелАЭС. Их подробная характеристика дана в [4]. Базовые геолого-гидрогеологические материалы накапливались в процессе выполнения государственных геологических съемок, научно-исследовательских работ ГП «НПЦ по геологии», ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» по проблемам неогео-динамики и региональной гидрогеологии Беларуси (А. К. Карабанов, А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич и др.), а также разработок по проблеме «Подземные воды» к обоснованию воздействия БелАЭС на окружающую среду (А. В. Кудельский, Н. М. Томина, В. И. Пашкевич и др.). Специальные гидрогеологические исследования выполнены в 2008–2009 гг. РУП «Геосервис» (П. С. Лисовский, А. В. Петух, А. А. Чекан и др.), в результате которых была получена ценная информация по подземным водам пятикилометровой зоны БелАЭС.

ЧГФМ междуречья Вилия – Гозовка создана на базе лицензионного программного обеспечения (ПО) «ModTech» ЗАО «Геолинк Консалтинг» (вычислительная программа (ВП) GWFS, разработчик А. А. Рошаль, г. Москва). Система управления качеством разработки ПО «Геолинк» в 2002 г. сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001 : 2000. Программа GWFS (Ground Water Flow Simulation – моделирование фильтрации подземных вод) предназначена для решения гидрогеологических (геоэкологических) 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 слое описывается в декартовой системе координат дифференциальным уравнением [5]:

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

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

В случае безнапорной фильтрации плановая проводимость однородного проницаемого слоя пропорциональна его мощности. При стационарной фильтрации левая часть уравнения (1) равна нулю. Для решения зависимости (1) в ВП GWFS использован метод конечных разностей (метод сеток), применение которого сводит дифференциальное уравнение (1) к системе алгебраических уравнений. Их решение осуществляется итерационным методом по неявной схеме (в ВП GWFS использован шахматный алгоритм Чебышева [5]). В последней версии программы добавлены следующие методы: PCG2 (метод сопряженного градиента) © US Geological Survey; SIP (метод неявного решения) © US Geological Survey; SSOR (метод полойной релаксации) © US Geological Survey; LMG (метод множественных сеток) © US Geological Survey.

Объект исследования. Объектом исследования являются подземные воды территории, ограниченной реками Виля, Ошмянка, Лоша и Гозовка (междуречье «ВОЛГ»). Практически в ее центре расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС (рис. 1).

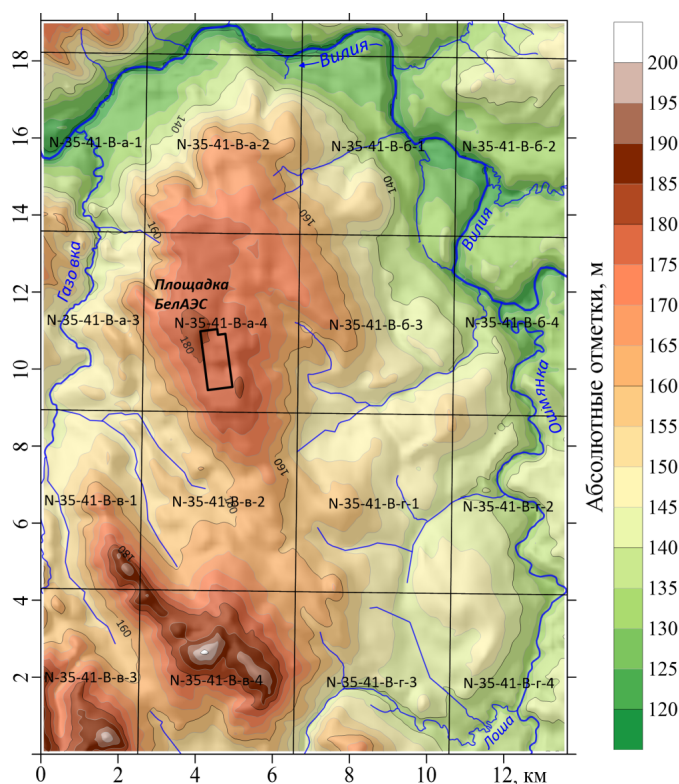


Рис. 1. Цифровая карта рельефа и гидрографической сети района Белорусской атомной электростанции (составил Ю. Ю. Трифонов)

Fig. 1. Digital map of the relief and hydrographic network of the Belarussian nuclear power plant area (compiled by Yu. Yu. Trifonov)

Согласно схеме гидрогеологического районирования [4], объект исследований расположен на западном склоне Белорусского гидрогеологического массива, разрез которого представлен породами кристаллического фундамента и осадочного чехла. По материалам бурения опорной скважины Островец-01 в пределах площадки размещения БелАЭС кристаллический фундамент, сложенный гранито-гнейсами, вскрыт на глубине 531 м. Горные породы до глубины 537 м сильно выветрелые, до глубины 544 м – трещиноватые. Вскрытая мощность кристаллических пород 44,0 м. Вышележащие отложения осадочного чехла мощностью 531 м представлены образованиями верхнего протерозоя, палеозоя и кайнозоя. В разрезе область фильтрации представляет собой переслаивание водоносных горизонтов (комплексов) и слабопроницаемых слоев.

При схематизации природных условий в районе БелАЭС и площадки для размещения ПЗРО нами сохранены структура и содержание геофильтрационной модели, созданной в РУП «БелНИГРИ» с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения БелАЭС (руководитель работы А. А. Чекан, разработчик модели Б. И. Коробейников). В гидрогеологическом разрезе исследуемого объекта по наличию слабопроницаемых слоев выделено пять водоносных горизонтов и четыре разделяющих слабопроницаемых слоя. После схематизации в разрезе остаются два вида расчетных слоев – водоносные горизонты и разделяющие их слои; все запасы воды содержатся в водоносных горизонтах. Движение воды происходит по водоносным горизонтам вдоль напластования горных пород. Связь водоносных горизонтов осуществляется путем перетока воды через слабопроницаемые разделяющие слои в соответствии с их мощностью и проницаемостью. Расчетная схема в разрезе представлена на рис. 2.

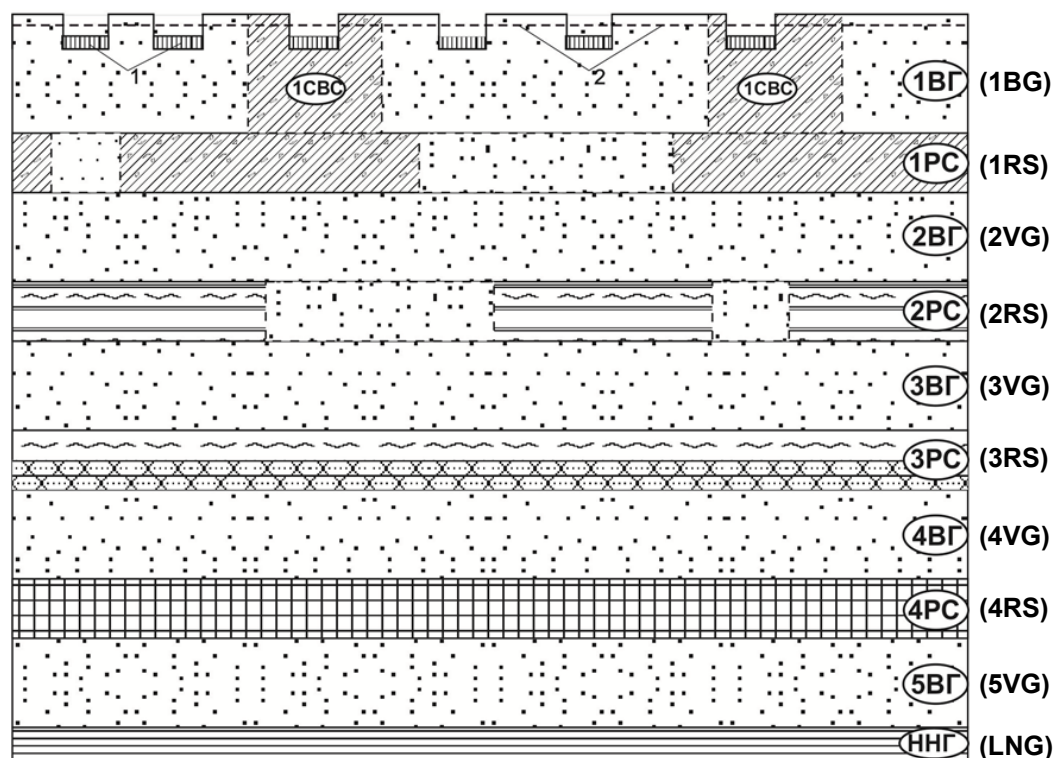


Рис. 2. Расчетная фильтрационная схема междуречья «ВОЛГ» в разрезе (на основе материалов РУП «БелНИГРИ» и РУП «Геосервис»):

1 – слабопроницаемые подрусловые отложения; 2 – уровенная поверхность грунтовых вод.

Водоносные горизонты: 1CBC – слабоводоносный слой (сожская морена в местах ее выхода на дневную поверхность); 1BG – грунтовый водоносный горизонт, приуроченный к современным аллювиальным, болотным, водно-ледниковым и моренным отложениям поозерского оледенения; 2BG – днепровский-сожский водно-ледниковый горизонт (комплекс); 3BG – березинский-днепровский водно-ледниковый горизонт (комплекс); 4BG – водоносный бриневский терригенный горизонт; 5BG – объединенный силурийский-девонский водоносный комплекс (горизонт).

Разделяющие слабопроницаемые слои: 1PC – моренные отложения сожского оледенения; 2PC – моренные отложения днепровского оледенения; 3PC – моренные отложения березинского оледенения и глины нижнего неогена; 4PC – отложения верхнего девона и нижнего неогена. HNG – нижняя непроницаемая граница (породы кристаллического фундамента)

Fig. 2. Calculation filtration scheme of the "VOLGA" interfluve in section (based on materials of the enterprise "BelNIGRI" and the enterprise "Geoservice"):

1 – weakly permeable sub-bed sediments; 2 – groundwater level surface.

Aquifers: 1WBC – weak water-bearing layer (Sozh moraine in places where it reaches the day surface); 1BG – ground water-bearing horizon confined to modern alluvial, bog, water-glacial and moraine sediments of the Poozerian glaciation; 2WG – Dneprovsky-Sozh water-glacial horizon (complex); 3WG – Berezinsky-Dneprovsky water-glacial horizon (complex); 4WG – water-bearing Brinevsky terrigenous horizon; 5WG – combined Silurian-Devonian water-bearing complex (horizon).

Separating weakly permeable layers: 1RS – moraine deposits of the Sozh glaciation; 2RS – moraine deposits of the Dnieper glaciation; 3RS – moraine deposits of the Berezinskii glaciation and clays of the Lower Neogene; 4RS – Upper Devonian and Lower Neogene deposits.

LNG – lower impermeable boundary (crystalline basement rocks)

По выделенным водоносным горизонтам и разделяющим слоям на основе материалов РУП «Геосервис» и РУП «БелНИГРИ» нами построены цифровые карты-схемы горизонтальной ($T = km$) и вертикальной ($A = k_0 / m_0$) водопроницаемостей (где k и m , k_0 и m_0 – коэффициент фильтрации и мощность водоносного и слабопроницаемого слоев соответственно).

В первом от поверхности земли водоносном горизонте выделяется пять зон горизонтальной водопроницаемости. 1-я зона: $T = 1 \text{ м}^2/\text{сут}$; 2-я зона: $T = 10 \text{ м}^2/\text{сут}$; 3-я зона: $T = 75 \text{ м}^2/\text{сут}$; 4-я зона: $T = 125 \text{ м}^2/\text{сут}$; 5-я зона: $T = 150 \text{ м}^2/\text{сут}$. Выделение зон горизонтальной водопроницаемости первого водоносного горизонта проводилось на основе карты-схемы мощностей песков аллювиальных, водноледниковых поозерских и моренных сожских отложений. Всего выделено пять зон. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m = 0\text{--}10 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 10\text{--}20 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 20\text{--}30 \text{ м}$; 5-я зона: $m = \text{более } 30 \text{ м}$.

Для второго водоносного горизонта также построены карты-схемы мощностей песчаных отложений, а затем оценено среднее значение коэффициента фильтрации, полученное по данным обработки кустовых откачек, выполненных РУП «Геосервис». Всего во втором водоносном горизонте выделено пять зон мощностей песчаных отложений. 1-я зона: $m = 0\text{--}10 \text{ м}$; 2-я зона: $m = 10\text{--}20 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 20\text{--}30 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 30\text{--}40 \text{ м}$; 5-я зона: $m = \text{более } 40 \text{ м}$. По данным трех кустовых откачек, оборудованных на днепровский-сожский водоносный комплекс (скважины № 2ц, 9ц, 69ц), среднее значение коэффициента фильтрации составило $8,2 \text{ м/сут}$. Для построения цифровых карт горизонтальной водопроницаемости принято $k = 8,0 \text{ м/сут}$. Поэтому во втором водоносном горизонте выделено пять зон горизонтальной водопроницаемости. 1-я зона: $T = 40 \text{ м}^2/\text{сут}$; 2-я зона: $T = 120 \text{ м}^2/\text{сут}$; 3-я зона: $T = 200 \text{ м}^2/\text{сут}$; 4-я зона: $T = 250 \text{ м}^2/\text{сут}$; 5-я зона: $T = 350 \text{ м}^2/\text{сут}$. Выделенные зоны водопроницаемости в качестве примера показаны на рис. 3.

Для обоснования карты-схемы горизонтальной водопроницаемости третьего водоносного горизонта сначала была построена карта мощностей песчаных отложений, в которой выделено шесть зон. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m = 0\text{--}5 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 5\text{--}10 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 10\text{--}15 \text{ м}$; 5-я зона: $m = 15\text{--}20 \text{ м}$; 6-я зона: $m = \text{более } 20 \text{ м}$. Затем по данным кустовой откачки из скважины № 16 были определены значения водопроницаемости и коэффициента перетока. На базе этих данных вычислены значения водопроницаемости третьего водоносного горизонта.

Четвертый водоносный горизонт изучен недостаточно. По нему выделено пять зон горизонтальной водопроницаемости. 1-я зона: $T = 1 \text{ м}^2/\text{сут}$; 2-я зона: $T = 7,5 \text{ м}^2/\text{сут}$; 3-я зона: $T = 22,5 \text{ м}^2/\text{сут}$; 4-я зона: $T = 37,5 \text{ м}^2/\text{сут}$ и 5-я зона: $T = 51 \text{ м}^2/\text{сут}$. Для выделения этих зон были построены карты-схемы мощностей песков. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m = 0\text{--}5 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 5\text{--}10 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 10\text{--}15 \text{ м}$; 5-я зона: $m = \text{более } 15 \text{ м}$. Осредненное значение коэффициента фильтрации для тонко- и мелкозернистых песков ($k = 3,0 \text{ м/сут}$) принято по литературным источникам.

Пятый водоносный горизонт также плохо изучен. Его горизонтальная водопроницаемость на основе материалов РУП «Геосервис» принята одним числом ($T = 53 \text{ м}^2/\text{сут}$ – среднее значение по кустовым откачкам из скважин № 4ц, 7ц, 11ц) [4].

Первый слабопроницаемый слой сложен супесями и суглинками сожской морены. По этому слою составлена карта-схема его мощностей в зонном представлении (1-я зона: $m_0 = 10 \text{ м}$; 2-я зона: $m_0 = 10\text{--}20 \text{ м}$; 3-я зона: $m_0 = 20\text{--}30 \text{ м}$; 4-я зона: $m_0 = \text{более } 30 \text{ м}$). Значения коэффициента фильтрации по данным РУП «Геосервис» изменяются от $0,001$ до $0,26 \text{ м/сут}$. Для расчетов на модели принято $k = 0,01 \text{ м/сут}$. Всего по первому слабопроницаемому слою выделено четыре зоны вертикальной водопроницаемости. 1-я зона: $A = 0,002 \text{ 1/сут}$; 2-я зона: $A = 0,0007 \text{ 1/сут}$; 3-я зона: $A = 0,0004 \text{ 1/сут}$; 4-я зона: $A = 0,0003 \text{ 1/сут}$.

Второй слабопроницаемый слой в основном сложен супесями и суглинками днепровской морены. По этому горизонту была составлена карта-схема его мощностей с выделением шести зон. 1-я зона: $m_0 = 0\text{--}5 \text{ м}$; 2-я зона: $m_0 = 5\text{--}10 \text{ м}$; 3-я зона: $m_0 = 10\text{--}15 \text{ м}$; 4-я зона: $m_0 = 15\text{--}20 \text{ м}$; 5-я зона: $m_0 = 20\text{--}25 \text{ м}$; 6-я зона – более 25 м . Для расчетов на модели принято значение коэффициента фильтрации, равное $0,14 \text{ м/сут}$, которое получено при обработке материалов кустовой откачки из скважины № 16. Всего по второму слабопроницаемому слою выделено шесть зон вертикальной водопроницаемости. 1-я зона: $A = 0,056 \text{ 1/сут}$; 2-я зона: $A = 0,019 \text{ 1/сут}$; 3-я зона: $A = 0,011 \text{ 1/сут}$; 4-я зона: $A = 0,008 \text{ 1/сут}$; 5-я зона: $A = 0,006 \text{ 1/сут}$; 6-я зона: $A = 0,005 \text{ 1/сут}$.

Третий слабопроницаемый слой представлен березинским моренным и нижненеогеновым комплексами. Для выделения зон вертикальной водопроницаемости этого слоя был определен по литературным данным коэффициент фильтрации, равный $0,005 \text{ м/сут}$, а также построена карта-схема его мощностей, состоящая из шести зон. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m_0 = 0\text{--}5 \text{ м}$; 3-я зона: $m_0 = 5\text{--}10 \text{ м}$; 4-я зона: $m_0 = 10\text{--}15 \text{ м}$; 5-я зона: $m_0 = 15\text{--}20 \text{ м}$; 6-я зона: более 20 м . По этим данным было выделено шесть зон вертикальной водопроницаемости третьего слабопроницаемого слоя: 1-я зона: $A = 0,1 \text{ 1/сут}$; 2-я зона: $A = 0,002 \text{ 1/сут}$; 3-я зона: $A = 0,00067 \text{ 1/сут}$; 4-я зона: $A = 0,0004 \text{ 1/сут}$; 5-я зона: $A = 0,00029 \text{ 1/сут}$; 6-я зона: $A = 0,00023 \text{ 1/сут}$.

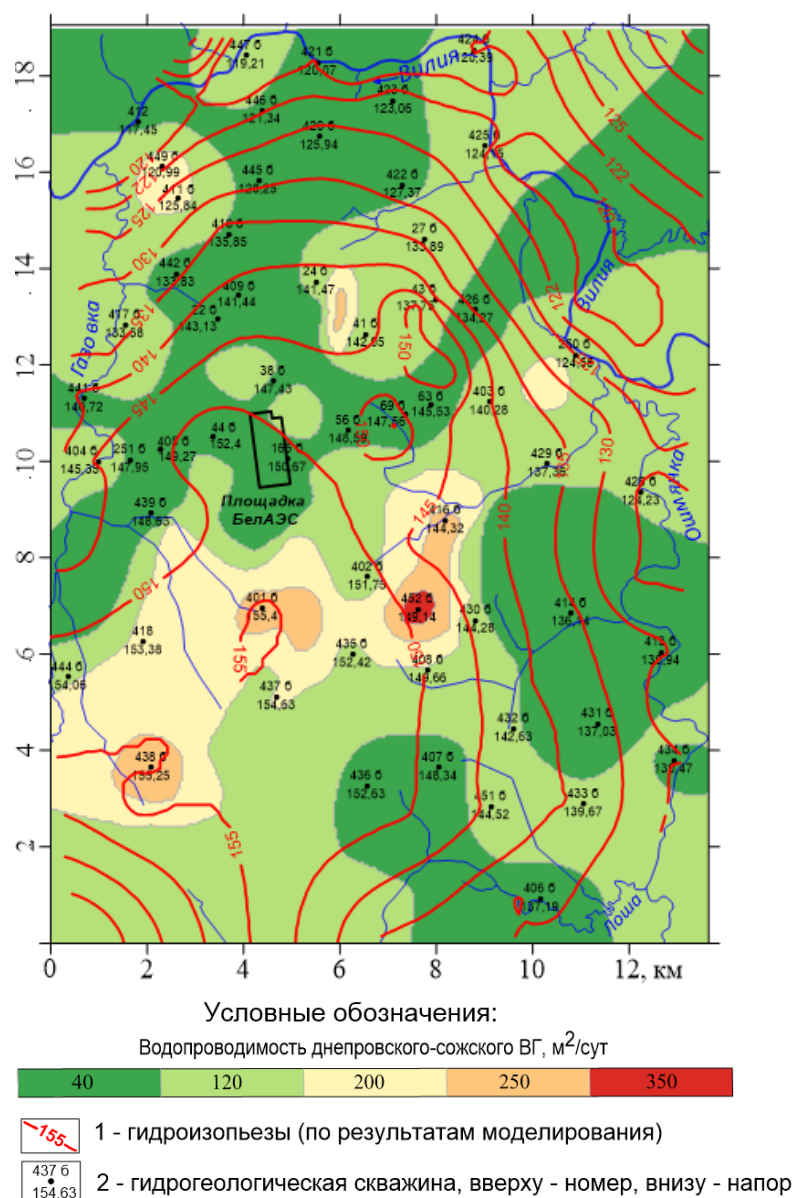


Рис. 3. Гидродинамическая карта днепровско-сожского водоносного горизонта

Fig. 3. Hydrodynamic map of the Dnieper-Sozh aquifer horizon

К четвертому слабопроницаемому слою отнесены глинистые отложениями неогена и девона. Изучены они недостаточно. Вертикальная проводимость слоя принята равной 0,01 1/сут по литературным данным.

Структура ЧГФМ объекта исследований. Для воспроизведения на ЧГФМ геологического строения и гидрогеологических условий междуречья «ВОЛГ» (рабочее название модели – «Bel-PZRO») моделируемая область в плане разбита на квадратные блоки (ячейки) размером 150 м × 150 м (всего 91 блок по оси X и 127 блоков по оси Y). В целом модель содержит 11 557 расчетных блоков (ячеек) в каждом слое.

В разрезе выделено 11 слоев: «зона аэрации», «поверхностные водоисточники», 5 водоносных горизонтов и 4 слабопроницаемых слоя. Зона аэрации в модели представлена двумя параметрами: интенсивность инфильтрационного питания и абсолютные отметки поверхности земли. При решении геофильтрационных задач в напорах наличие 2-го параметра позволяет вычислять глубины залегания УГВ. Слой «поверхностные воды» предназначен для задания данных по параметрам взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками (водоемами). Для моделирования подпертого режима взаимосвязи заданы следующие параметры: признак наличия рек; абсолютные отметки уровней воды в реках; коэффициент проводимости ложа рек.

На внешних (боковых) границах исходной модели по всем водоносным горизонтам приняты граничные условия второго рода с нулевым расходом. Нижней границей моделируемой области являются слабопроницаемые отложения, подстилающие водоносный силурийский-девонский карбонатный комплекс, – преимущественно глинистые образования кембрия и ордовика, а также непроницаемые породы кристаллического фундамента. На верхней границе модели заданы напоры ГВ на период летне-осенней межени. Река Вилия и ее притоки представляют собой внутренние границы третьего рода.

Реализация гидродинамических условий на верхней границе модели «Bel-PZRO». Верхней границей ЧГФМ «Bel-PZRO» является уровенная поверхность ГВ (свободная поверхность потока). В моделях реальных гидрогеологических объектов она воспроизводится на основе карт гидроизогипс. Исходные данные для построения таких карт получают при изучении положения уровней ГВ в скважинах и колодцах, а также выходов (источников) ГВ на поверхность Земли. К верхней границе модели относится и гидрографическая сеть. Количественное представление уровенной поверхности ГВ, включая и межпластовые водоносные горизонты, зависит от особенностей решаемой гидродинамической задачи. При постоянной величине площадного питания ГВ задачу можно решать не в напорах, а в изменениях напоров подземных вод. Такое условие позволяет резко упростить реализацию гидродинамических условий на верхней границе – принять уровенную поверхность ГВ горизонтальной, т. е. напоры по всей территории задать одним числом (обычно $H = 0$). Назначение созданной ЧГФМ «Bel-PZRO» предопределяет необходимость решения гидродинамических задач в напорах (а не в изменениях напоров). Для решения задач в такой постановке, наряду со стандартным набором исходных параметров, требуются количественные данные об интенсивности инфильтрационного питания ГВ по всей площади моделируемого объекта. Такие сведения по междуречью Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка в настоящее время отсутствуют.

Решение задачи по оценке интенсивности инфильтрационного питания ГВ возможно при наличии карты гидроизогипс и данных об основных гидрогеологических параметрах по методике, разработанной нами совместно с А. А. Плетневым [6]. Суть методики заключается в задании над грунтовым (верхним) водоносным горизонтом фиктивной границы третьего рода в виде слабопроницаемого слоя и водоема. В фиктивном водоеме задаются такие же напоры, как и в самом водоносном горизонте. Коэффициент перетока (χ_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.

Карта гидроизогипс в радиусе пятикилометровой зоны вокруг площадки БелАЭС имеется. Она составлена А. В. Кудельским в рамках государственной программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на период до 2020 года». Карта также опубликована в книге [4]. Хотя объект исследований в целом изучен весьма детально, карта гидроизогипс А. В. Кудельского мало пригодна для оценки площадного питания ГВ, так как хорошо изучены только площадки размещения БелАЭС и ПЗРО. Морфология рельефа в пределах междуречья весьма сложна, уклоны поверхности земли велики, а проницаемость подстилаемых отложений изменяется в очень широком интервале на коротких расстояниях. Построение представительной карты гидроизогипс, в особенности для больших по площади объектов, является весьма сложной и дорогостоящей задачей, так как требуются значительные финансовые и материальные затраты на бурение скважин и ведение режимных наблюдений. Отметки уровней ГВ между точками наблюдений определяются путем линейной интерполяции, что еще больше снижает достоверность и надежность карты. Можно утверждать, что с высокой степенью достоверности измеряются только уровни подземных вод в точках местоположения скважин и колодцев (при соблюдении технологии измерений).

В связи с этим для оценки интенсивности площадного питания ГВ на территории междуречья Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка нами использована связь между уровенной поверхностью ГВ и рельефом местности. На основе общеизвестной и всеми признанной связи между рельефом и депрессионной поверхностью ГВ также можно утверждать, что уровенная поверхность ГВ в сглаженной форме «повторяет» поверхность земли, снижаясь от возвышенных (междуречных) участков территории к дренирующим понижениям в рельефе [7].

Для оценки площадной вариации интенсивности инфильтрационного питания ГВ на основе сформулированных выше утверждений предлагается использовать методику Плетнева – Жогло [6], но отталкиваясь от рельефа исследуемого объекта. Другими словами, над грунтовым (верхним) водоносным горизонтом задается фиктивная граница третьего рода в виде слабопроницаемого слоя с фиктивными напорами над его кровлей, равными абсолютным отметкам поверхности земли. В качестве аналога фиктивного слабопроницаемого слоя может рассматриваться зона аэрации. Данные по реальным пунктам мониторинга уровенного режима ГВ используются в качестве контрольных точек, по которым производится согласование фактических и модельных величин напоров ГВ.

При обосновании технологии воспроизведения площадного питания ГВ учтено, что модель «Bel-PZRO» реализована на базе вычислительной программы GWFS [5], в которой инфильтрационное питание или испарение ГВ через зону аэрации вычисляется на основе уравнения

$$Q_{b,i,j} = Q_{r,i,j} + Q_{i,i,j} \quad (2)$$

где $Q_{r,i,j}$ – расход ГВ в поверхностные водотоки или приток воды в пласт из водотоков в пределах расчетного блока модели с координатами i, j ; $Q_{i,i,j}$ – инфильтрационное питание (испарение) ГВ через зону аэрации.

Инфильтрационное питание реализуется на основе зависимости

$$Q_{i,i,j} = w_{i,j} \Delta X_i \Delta Y_j, \quad (3)$$

где $w_{i,j}$ – интенсивность инфильтрационного питания в пределах расчетного блока модели с координатами i, j ; ΔX_i и ΔY_j – размеры блока по осям X и Y соответственно.

Взаимосвязь ГВ с поверхностными водотоками воспроизводится в соответствии с выражением

$$Q_{r,i,j} = T_{r,i,j} (H_{r,i,j} - H_{i,j}), \quad (4)$$

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

$$T_{r,i,j} = \chi_{r,i,j} N_{r,i,j} L_{r,i,j}, \quad (5)$$

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.

Калибрация ЧГФМ «Bel-PZRO». Калибрация исходной модели заключалась в решении эпигнозных задач по оценке коэффициента взаимосвязи речных и ГВ, коэффициента перетока слабопроницаемого слоя сожской морены и результирующей величины инфильтрационного питания при заданных граничных условиях и параметрах водоносных горизонтов путем согласования фактических и модельных напоров подземных вод грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов на меженьный период. Решение задачи производилось подбором путем прогонки ряда прямых задач при различных значениях искомых параметров. Для упрощения процедуры подбора коэффициентов перетока слабопроницаемого слоя сожской морены и взаимосвязи речных и грунтовых вод был использован методический подход, изложенный выше. Уточнение вертикальной проводимости (коэффициента перетока) сожской морены стало возможным благодаря высокой гидрогеологической изученности грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов. Расчеты выполнены по методике, разработанной нами совместно с А. А. Плетневым [6, 8].

По терминологии И. К. Гавич [9] суммарный приток в расчетный блок через его верхнюю грань $Q_{b,i,j}$ в зависимости (2) представляет собой интегральную величину площадного (поблочного) питания ГВ, которое при заданных гидрогеологических параметрах и граничных условиях обеспечивает принятые к расчету уровни ГВ. Из рис. 3 и 4 видно, что использованные методические подходы решения обратной задачи позволили добиться приемлемой сходимости модельных и фактических напоров подземных вод днепровского-сожского и грунтового водоносных горизонтов в междуречье «ВОЛГ».

На втором этапе калибрации модели получен заданный модельный подземный сток в реки. При этом близость модельных и фактических уровней ГВ, а также напоров подземных вод по другим горизонтам, не ухудшилось. Значение модуля подземного стока в междуречье Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка взято нами с карт подземного стока, составленных С. С. Белецким [10, 11]. Его среднее значение равно 4,0 л/с км².

Для того чтобы получить на модели нужную величину подземного стока в реки, речная сеть и инфильтрационное питание ГВ должны быть воспроизведены на модели в явном виде. Реки, заданные на ЧГФМ «Bel-PZRO», показаны на рис. 1, 3, 4. Всего они содержатся в 693 расчетных блоках, что составляет 6,0 % от общего числа расчетных блоков модели «Bel-PZRO». Как видно, речная сеть на исследуемой территории имеет подчиненное значение. Объясняется это тем, что площадка БелАЭС находится на самой возвышенной части междуречья «ВОЛГ».

Результаты моделирования фильтрации подземных вод. По результатам расчетов на модели «Bel-PZRO» оценена структура баланса подземных и поверхностных вод, построены карты гидроизогипс (рис. 4) и глубины залегания ГВ, карты гидроизопьез днепровского-сожского и березинского-днепровского водоносных горизонтов, а также карта площадного питания ГВ.

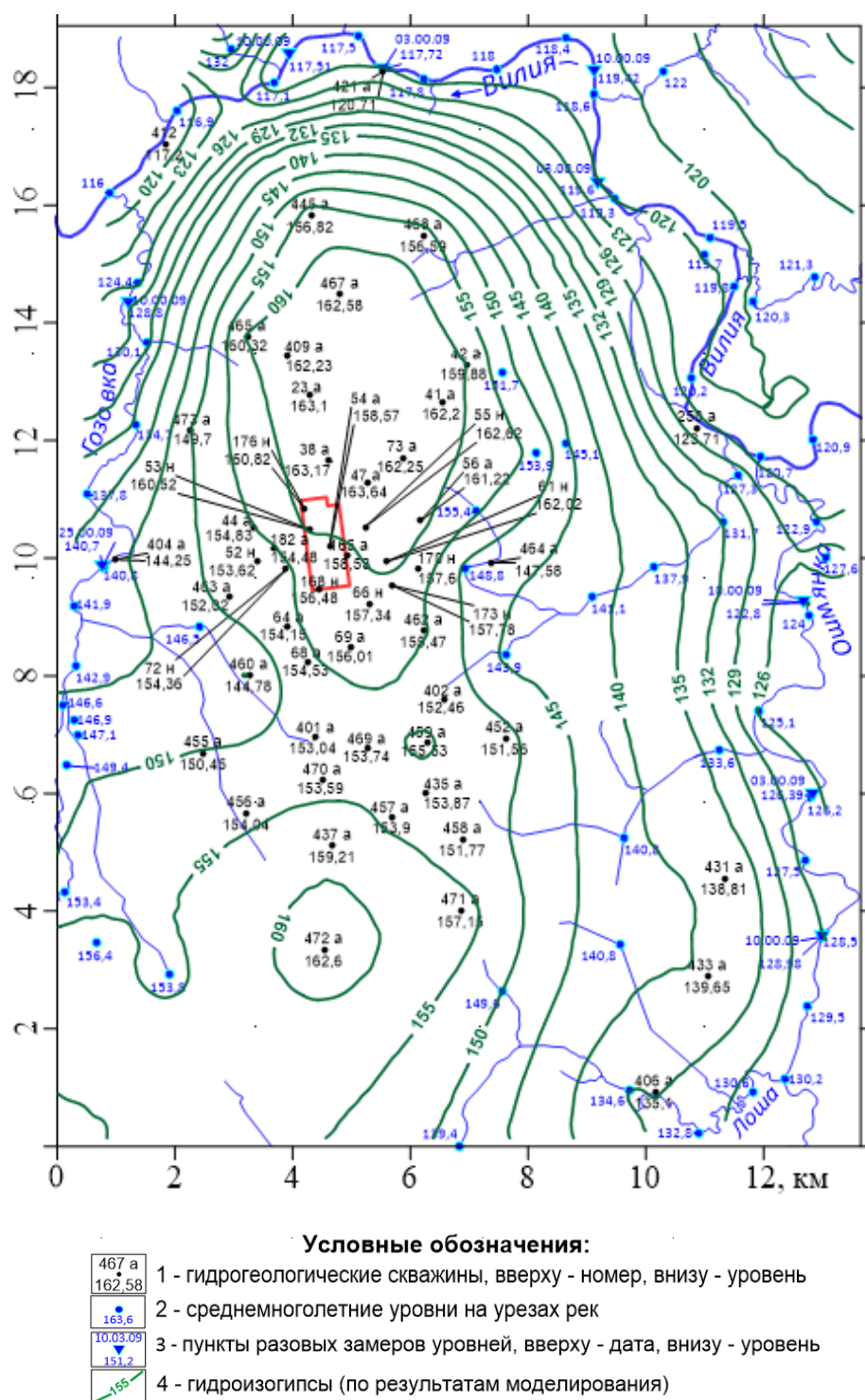


Рис. 4. Цифровая карта гидроизогипс междуречья Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка (по результатам моделирования)

Fig. 4. Digital map of hydroisogyps of the interfluvium Viliya – Gozovka – Losha – Oshmyanka (based on modeling results)

Суммарная величина результирующего питания ГВ, равная 91 994 м³/сут (высота слоя воды 128,8 мм/год), представляет собой наиболее обеспеченную часть естественных ресурсов подземных вод в междуречье «ВОЛГ». Их распределение по территории междуречья, площадь которого равна 260,0 км², показано на рис. 5.

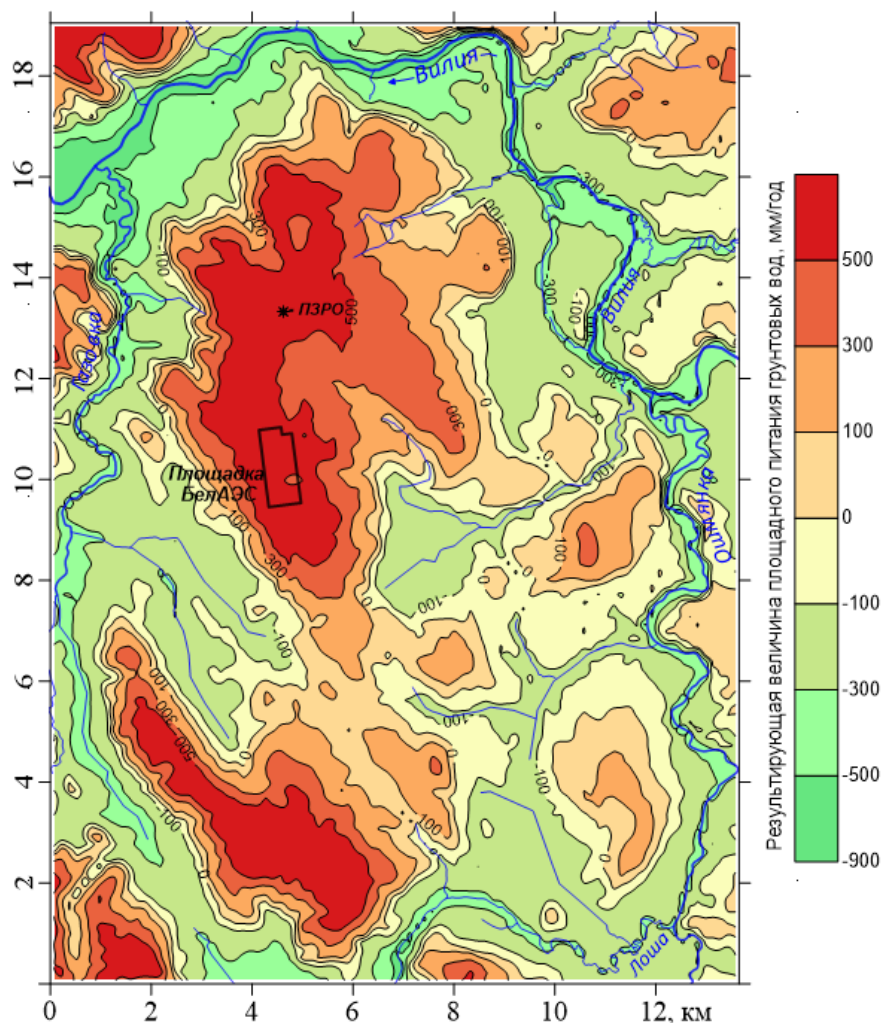


Рис. 5. Цифровая карта площадного питания и испарения грунтовых вод в междуречье Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянк (по результатам моделирования)

Fig. 5. Digital map of areal recharge and evaporation of groundwater in the interfluvium Viliya – Gozovka – Losh – Oshmyanka (based on modeling results)

Область питания ГВ составляет 172 км² (66 % территории междуречья). Разгрузка ГВ в речную сеть и путем испарения с депрессионной поверхности имеет место на территории площадью 88 км² (34 %). Интенсивность инфильтрационного питания и испарения изменяется весьма сильно даже на коротких расстояниях.

Расход ГВ осуществляется в нижележащий днепровский-сожский водоносный горизонт (60 010 м³/сут; слой стока 84,0 мм/год) и поверхностные водоисточники (31984 м³/сут; слой стока 44,8 мм/год). Инфильтрационное питание и испарение ГВ с депрессионной поверхности через зону аэрации по блокам с реками в отдельную статью баланса не выделено в связи с небольшими размерами расчетных блоков модели «Bel-PZRO» (150 м x 150 м). По таким блокам модели вся результирующая величина питания (расходования) ГВ отнесена к поверхностным водоисточникам. Как видно, 65 % ресурсов ГВ расходуется на формирование ресурсов подземных вод нижележащих водоносных горизонтов.

Естественные ресурсы межпластовых вод днепровского-сожского водоносного горизонта равны 60 010 м³/сут (высота слоя воды 84,0 мм/год). Их формирование происходит за счет нисходящей фильтрации ГВ. Интенсивность питания на водоразделах через днепровскую морену изменяется по площади от нуля до 100 мм/год и более. В долине р. Вилия и на пониженных элементах рельефа имеет место восходящая разгрузка межпластовых вод (рис. 6).

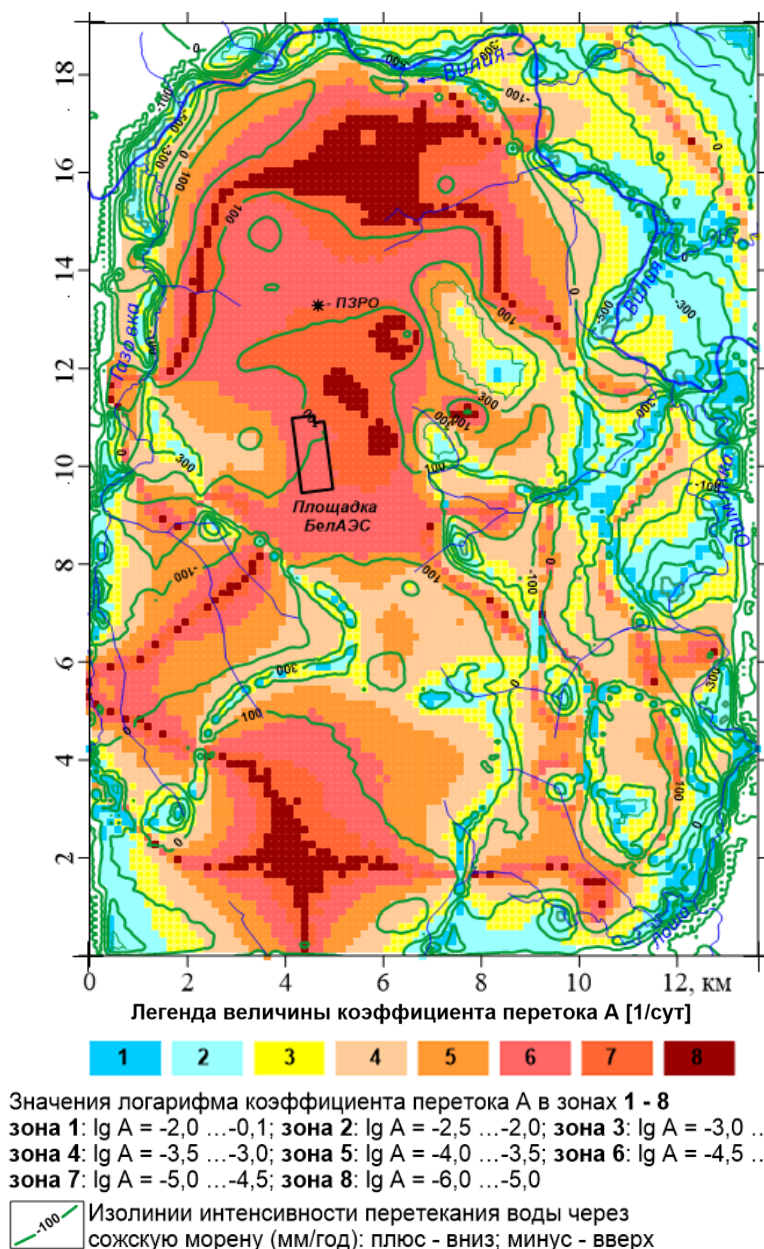


Рис. 6. Карта защищенности днепровского-сожского водоносного горизонта

Fig. 6. Map of the protection of the Dnieper-Sozh aquifer

На рис. 6 по результатам моделирования представлены количественные оценки вертикальной проводимости сожской морены и интенсивность водообмена между грунтовым и днепровским-сожским водоносными горизонтами, которые в целом характеризуют защищенность днепровского-сожского водоносного горизонта от источников поверхностного загрязнения. Стоит отметить, что по модельным оценкам вертикальная проницаемость слабопроницаемого слоя, представленного супесями и суглинками сожской морены, примерно на порядок ниже результатов, полученных РУП «Геосервис» по данным опытно-фильтрационных работ.

Заключение. На базе лицензионной вычислительной программы GWFS (ЗАО «Геолинк», Москва) создана ЧГФМ междуречья Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка, предназначенная для численного моделирования миграции подземных вод в районе Белорусской АЭС. На модели воспроизведены грунтовый, днепровский-сожский, березинский-днепровский, бриневский и силурийский-девонский водоносные горизонты, разделяющие их слабопроницаемые слои, рельеф и гидрографическая сеть. Для численного моделирования взаимосвязи поверхностных, грунтовых и межпластовых вод использованы авторские методические разработки, применение которых дало возможность оценить величину естественных ресурсов подземных вод, формирующихся в междуречье «ВОЛГ». Из соотношения естественных ресурсов подземных вод грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов следует, что в междуречье «ВОЛГ» вертикальная компонента фильтрации подземных вод существенно преобладает над ее горизонтальной составляющей.

Список использованных источников

1. Стратегия обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 2 июня 2015 г. № 460. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0>. – Дата доступа: 04.06.2015.
2. Сравнительные оценки безопасности захоронения радиоактивных отходов на альтернативных площадках Островского пункта на стадии концептуального проекта / Н. М. Ширяева [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Объед. Ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны. – Минск, 2010. – 64 с. – (Препринт ОИЭЯИ ; 44).
3. Выбор альтернативных площадок для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов в Беларуси / Н. М. Ширяева [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Объед. Ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны. – Минск, 2010. – 38 с. – (Препринт ОИЭЯИ ; 43).
4. Подземные воды Островского региона Беларуси / А. В. Кудельский и [др.]. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 101 с.
5. Постоянно действующие модели гидrolитосферы территорий городских агломераций (на примере Московской агломерации) / Ю. О. Зеегофер [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 198 с.
6. Жогло, В. Г. К оценке интенсивности площадного питания подземных вод / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады АН Беларуси. – 1992. – Т. XXXVI, № 11–12. – С. 1005–1007.
7. Всеволожский, В. А. Основы гидрогеологии / В. А. Всеволожский. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 351 с.
8. Жогло, В. Г. Оценка фильтрационных свойств слабопроницаемых отложений для прогноза качества подземных вод вблизи источника загрязнения / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады АН Беларуси. – 1996. – Т. 40, № 1. – С. 114–117.
9. Гавич, И. К. Многолетняя изменчивость питания и режима подземных вод природно-техногенных систем верхнего этажа гидrolитосферы : обзор / И. К. Гавич ; АОЗТ «Геоинформмарк». – М., 1995. – Вып. 4. – 42 с. – (Гидрогеол. и инж. геология.).
10. Белецкий, С. С. Общий подземный сток БССР / С. С. Белецкий // Комплексное использование и охрана подземных вод БССР. – Минск, 1976. – С. 20–36.
11. Белецкий, С. С. Опыт оценки подземного стока в реки БССР / С. С. Белецкий // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. – Минск, 1974. – С. 60–74.

References

1. *Strategiya obrasheniya s radioaktivnymi othodami Belorusskoj atomnoj elektrostancii* [Strategy for managing radioactive waste of the Belarusian Nuclear Power Plant]. Available at: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0> (accessed June 4, 2015). (in Russian)
2. Shiryayeva N. M. [et al.] *Sravnitelnye ocenki bezopasnosti zahoroneniya radioaktivnykh othodov na alternativnykh ploshadkakh Ostroveckogo punkta na stadii konceptualnogo proekta* [Comparative assessments of the safety of radioactive waste disposal at alternative sites at the Ostrovets site at the conceptual design stage]. National Academy of Sciences of Belarus, Joint Institute for Power and Nuclear Researches – Sosny. Minsk, 2010, 64 p. (in Russian)
3. Shiryayeva N. M., Skurat V. V., Yatsko S. N., Denisova V. V., Myshkina N. K., Tomina N. M., Zakharov A. A., Zhukova O. M., Belyashov A. V. *Vybor alternativnykh ploshadok dlya razmesheniya punkta zahoroneniya radioaktivnykh othodov v Belarusi* [Selection of alternative sites for locating a radioactive waste disposal facility in Belarus]. National Academy of Sciences of Belarus, Joint Institute for Power and Nuclear Researches – Sosny. Minsk, 2010, 38 p. (in Russian)
4. *Podzemnye vody Ostroveckogo regiona Belarusi* [Groundwater of the Ostrovets region of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012, 101 p. (in Russian)
5. Zeegofer Yu. O., Klyukvin A. N., Pashkovskij I. S., Roshal A. A. *Postoyanno dejstvuyushie modeli gidrolitosfery territorij gorodskih aglomeracij (na primere Moskovskoj aglomeracii)* [Permanent models of the hydrolithosphere of urban agglomeration territories (using the example of the Moscow agglomeration)]. Moscow, Navuka Publ., 1990, 198 p. (in Russian)

6. Zhoglo V. G., Pletnev A. A. *K ocenke intensivnosti ploshadnogo pitaniya podzemnyh vod* [Towards assessing the intensity of areal groundwater recharge]. *Doklady AN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1992, vol. XXXVI, no. 11–12, pp. 1005–1007. (in Russian)
7. Vsevolozhsky V. A. *Osnovy gidrogeologii* [Basics of hydrogeology]. Moscow, Moscow State University Publ., 1991, 351 p. (in Russian)
8. Zhoglo V. G., Pletnev A. A. *Ocenka filtracionnyh svoystv slabopronicaemyh otlozhenij dlya prognoza kachestva podzemnyh vod vblizi istochnika zagryazneniya* [Assessing the filtration properties of low-permeability sediments to predict the quality of groundwater near a pollution source]. *Doklady AN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1996, vol. 40, no. 1, pp. 114–117. (in Russian)
9. Gavich I. K. *Mnogoletnyaya 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]. Review of AOZT "Geoinformmark", Hydrogeol., eng. geology, Moscow, 1995, Issue 4, 42 p. (in Russian)
10. Beleckij S. S. *Obshij podzemnyj stok BSSR* [Total underground flow of the BSSR]. Integrated use and protection of groundwater in the BSSR. Minsk, 1976, pp. 20–36. (in Russian)
11. Beleckij S. S. *Opyt ocenki podzemnogo stoka v reki BSSR* [Experience in assessing underground flow into rivers of the BSSR]. *Issues of hydrogeology and engineering geology*. Minsk, 1974, pp. 60–74. (in Russian)

Информация об авторе

Жогло Василий Гаврилович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией гидрогеологии и гидроэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

Information about the author

Vasily G. Zhoglo – Dr. Sc. (Geological and Mineralogical), 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

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ САПРОПЕЛЯ В СОСТАВЕ НАЦИОНАЛЬНОГО БОГАТСТВА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

О. М. Гайдукевич, Б. В. Курзо, А. И. Сорокин

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Оценено место ресурсов сапропеля в системе национального богатства Республики Беларусь. Составлен перечень перспективных для освоения месторождений, включающий детально изученные, активно осваиваемые в настоящее время и бывшие прежде в эксплуатации объекты с предпочтительными горно-геологическими условиями и созданной ранее инфраструктурой. По данным геолого-экономической оценки детально изученных месторождений сапропеля установлены стоимость и чистый дисконтированный доход извлекаемых запасов сапропеля репрезентативных месторождений. Оцененная по состоянию на 1 января 2024 г. стоимость перспективных сапропелевых ресурсов Беларуси составляет 1,18 млрд долл. США.

Ключевые слова: сапропель; запасы; национальное богатство.

Для цитирования. Гайдукевич О. М., Курзо Б. В., Сорокин А. И. Оценка запасов сапропеля в составе национального богатства Республики Беларусь // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 126–136.

THE ASSESSMENT OF SAPROPEL RESERVES IN THE COMPOSITION OF THE NATIONAL WEALTH OF THE REPUBLIC OF BELARUS

O. M. Gaidukevich, B. V. Kurzo, A. I. Sorokin

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

Abstract. The place of sapropel resources in the system of the National Wealth of the Republic of Belarus is assessed. A list of promising deposits for development has been compiled. Objects with preferable mining and geological conditions and previously created infrastructure were selected that had been studied in detail, are currently being actively developed and were previously in operation. According to the geological and economic assessment of the detailed studied sapropel deposits the cost and net present value of the recoverable sapropel reserves of representative deposits were established. The estimated value of promising sapropel resources in Belarus as for January 1, 2024 is \$1.18 billion.

Keywords: sapropel; reserves; the National Wealth.

For citation. Gaidukevich O. M., Kurzo B. V., Sorokin A. I. The assessment of sapropel reserves in the composition of the National Wealth of the Republic of Belarus. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 126–136.

Введение. В мировой практике под национальным богатством (НБ) обычно понимается совокупность ресурсов страны, составляющих необходимое условие производства товаров, оказания услуг и обеспечения жизни людей. По источникам происхождения в составе НБ выделяют две основные части: произведенные активы (природные ресурсы) и национальное имущество (рукотворное НБ) [1]. Природные ресурсы (природные богатства) составляют первую важнейшую группу ресурсов, куда включаются учтенные и вовлеченные в экономический оборот невозобновляемые (земля, полезные ископаемые) и возобновляемые природные ресурсы (вода, воздух, растительные и животные ресурсы).

Структура НБ Республики Беларусь в оценке Всемирного банка 2018 г. выглядит следующим образом: человеческий капитал – 52,6 %; произведенный капитал – 39,7; природный капитал – 12,3 (из них 85 % – возобновляемые источники, 5 % – невозобновляемые); чистые иностранные активы – –4,6 %. В структуре природного капитала Республики Беларусь доминируют леса (33,2 %) и сельскохозяйственные угодья (25,8 %).

Рассчитанный на 2018 г. показатель НБ в части природного капитала требует дальнейшего развития, так как некоторые его элементы, влияющие на величину НБ, в настоящее время не учитываются из-за недостатка данных и требуют дальнейшей детализации каждого его элемента [2]. Поэтому цель

работы – показать место ресурсов органического сырья – сапропеля – в структуре НБ Республики Беларусь.

Ресурсы недр считаются экономически пригодными (и, следовательно, включаются в национальный баланс), когда они хорошо разведаны, их добыча рентабельна с учетом существующих цен и технологий, а также когда они находятся в собственности хозяйствующих субъектов.

Полезные ископаемые в зависимости от надежности методов, которыми подтверждены их наличие и объем, подразделяются на запасы и ресурсы. По экономическому значению запасы полезных ископаемых можно разделить на две основные группы: балансовые (экономические) и забалансовые (потенциально экономические) [3].

В республике имеется развитая система учета и отчетности информации об используемых запасах полезных ископаемых, на основании которой необходимо обосновать экономическую и стоимостную ценность минеральных ресурсов как объекта учета в составе НБ. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (Минприроды) ежегодно концентрирует информацию о состоянии и движении запасов полезных ископаемых на разрабатываемых месторождениях всех полезных ископаемых всех недропользователей и публикует «Агрегированные первичные статистические данные показателей разработки месторождений и первичной переработке (обогащения) полезных ископаемых по форме 1-полезные ископаемые».

В учете элементов НБ особый интерес имеют доступные к разработке доказанные минеральные ресурсы (запасы полезных ископаемых):

- геологически изученные (детально (А) и предварительно (В + С₁) разведанные месторождения);
- экономически целесообразные (на основании геолого-экономической оценки целесообразности освоения месторождения, осуществляемой при детальной разведке, разработка является рентабельной или условно рентабельной);
- доступные к разработке (на которые имеются технологии добычи и когда логистическая инфраструктура или месторождение ранее разрабатывалось).

Выявление таких перспективных запасов сапропелевых ресурсов и их стоимостная оценка входят в задачи настоящего исследования.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являются детально изученные, активно осваиваемые в настоящее время и бывшие ранее в эксплуатации месторождения сапропеля в озерах и под торфяной залежью.

Методы денежной оценки полезных ископаемых разработаны в начале 1930-х годов Л. К. Траскоттом, Г. К. Гувером, П. Батманом и др. [4]. В конце 1970-х годов окончательно принят принципиально новый (на тот момент) рентный подход к денежной оценке природных ресурсов, а в 1980 г. утверждена «Временная типовая методика экономической оценки месторождений полезных ископаемых» [5]. В дальнейшем этот подход распространен и на все другие природные ресурсы. На современном этапе рентный подход к стоимостной оценке природных ресурсов в нашей стране продолжают развивать А. В. Неверов, И. В. Войтов, Т. П. Водопьянова, А. В. Томашевич, О. С. Шимова, Н. К. Соколовский и др. [6–10].

Стоимостной оценкой основных направлений использования торфяных и сапропелевых месторождений и других полезных ископаемых на основе доходного подхода в отечественной практике занимаются А. В. Унукович и Я. И. Аношко [11, 12], которые, в свою очередь, опираются на методики западных экономистов, таких как К. Р. Макконнелл [13], Э. Дж. Долан и Д. Линдсей [14]. Среди ученых ближнего зарубежья доходный подход в оценке минеральных ресурсов разрабатывали С. Н. Бабылев и А. Ш. Ходжаев [4], Ф. В. Вельмер [15], А. П. Дергачев и Л. Д. Казаченко [16].

В соответствии с установившейся практикой существует система национальных счетов (СНС) – согласованный на международном уровне стандартный набор рекомендаций по исчислению показателей экономической деятельности. Первое условие – в балансе СНС учитывается стоимость только тех активов, которые имеют идентифицируемого владельца (это может быть государство), владелец актива должен иметь возможность извлекать из него экономическую пользу. Второе условие – способность приносить экономическую выгоду – может толковаться в довольно широких рамках. Например, озера служат источником сапропеля – полезного ископаемого, используемого в различных отраслях хозяйства и, следовательно, могут приносить экономическую пользу, однако труднодоступные водоемы могут приносить ее в отдаленном будущем, а порядок включения или не включения их в состав активов СНС определяется произвольно [3].

В настоящее время в большинстве стран мира, в том числе в Беларуси и России, при оценке НБ используется редакция СНС 2008 г. Разработанные на ее основе методики экономической оценки запасов полезных ископаемых и водных ресурсов в стоимостном выражении как элементов НБ утверждены в составе технических нормативных правовых актов Минприроды [17, 18]. Данные тех-

нические кодексы устанавливают цели, задачи и порядок проведения стоимостной оценки запасов полезных ископаемых и геотермальных ресурсов недр. Среди задач, которые должен решать ТКП 17.02-15-2016 [18], есть в том числе и «...экономическое обоснование запасов недр как элемента НБ». В данном ТКП выработаны принципиальные подходы к оценке месторождений полезных ископаемых, приведен перечень показателей их стоимостной оценки и изложены методические основы их расчета, в том числе определения чистого дисконтированного дохода (NPV).

Основой для стоимостной оценки запасов по ТКП 17.04-08-2008 [17] является метод чистой приведенной стоимости (чистого дисконтированного дохода, чистой современной стоимости), в соответствии с которым определяется ресурсная (горная) рента и на ее основе оценивается приведенная стоимость запасов полезных ископаемых. Этот метод в соответствии с рекомендациями СНС-2008 [19] утвержден Статистической комиссией ООН как основной метод для расчетов стоимости запасов минерально-энергетических ресурсов.

Дисконтирование – процесс приведения денежных средств, получаемых в будущем, к более раннему моменту времени. Для сравнения денежных средств используются два основных понятия: будущая (конечная) стоимость денег (FV) и настоящая (текущая, современная) стоимость денег (PV). Будущая стоимость денег представляет собой сумму инвестированных в настоящий момент средств (PV), в которую они превратятся через некоторый период времени (T) с учетом определенной ставки процента (r) или при определенном коэффициенте дисконтирования (E) [13, 15].

Коэффициенты дисконтирования – это понижающие коэффициенты, используемые в расчете нынешней стоимости будущих доходов и рассчитываемые по формуле

$$E = \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

где E – коэффициент дисконтирования; r – ставка дисконта, деленная на 100, %; t – порядковый номер года расчетного периода разработки месторождения.

Дисконтированный денежный поток (чистый дисконтированный доход) – это сумма сегодняшней текущей стоимости всех прогнозируемых на весь инвестиционный период будущих доходов с учетом потери части стоимости денег со временем, определяемая по формуле [13]:

$$NPV = \sum_{t=1}^T NCF_t E, \quad (2)$$

где NPV – чистый дисконтированный доход; T – период разработки месторождения; NCF_t – годовой чистый доход; t – порядковый номер года расчетного периода разработки месторождения; E – коэффициент дисконтирования.

Результаты и их обсуждение. На методической основе указанных нормативно-правовых актов Институтом природопользования НАН Беларуси в 2017–2023 гг. выполнена геолого-экономическая оценка месторождений сапропеля, которая является одним из этапов детальной разведки месторождений и предусматривает определение показателей методами прямого расчета или с использованием данных по объекту-аналогу. Для стоимостной оценки освоения запасов сапропеля выбраны репрезентативные объекты, которые в настоящее время активно осваиваются и на которые имеются современные сведения об их результативной работе. К таким объектам относятся месторождение сапропеля в озере Червоное Житковичского района Гомельской области (детальная разведка сапропеля в восточной части озера с подсчетом запасов по состоянию на 22.12.2019 [20] и участок «Млынок-2» торфяного месторождения Удховда Пружанского района Брестской области [21]. На этих объектах геолого-экономическая оценка выполнена методом прямого расчета на основании полученных исходных данных в соответствии с [22] (табл. 1).

На оз. Червоное с 1978 г. действует объект по добыче сапропеля. Месторождение в восточной части озера в настоящее время осваивает ОАО «Житковичхимсервис», добывающее сапропель по гидромеханизированной технологии. За период освоения на озере добыто и переработано более 1390 тыс. т сапропеля условной влажности 60 %. Наибольшие объемы добычи сапропеля характерны для периода с 1978 по 1991 г., когда за 14 лет суммарно было заготовлено 813,3 тыс. т сапропеля. Для производства работ по добыче сапропелевого сырья создана соответствующая инфраструктура: оборудованные системой обезвоживания пульпы чеки-отстойники общей площадью около 100 га, подъездные пути общей протяженностью 5,5 км, плавучий и наземный пульпопровод, бустерная станция для перекачки пульпы в отстойники, плавучий понтон с погружным насосом. В 2013–2014 гг. осуществлена замена добычного оборудования (понтон, насос, пульпопровод). За последние пять лет средний годовой объем добычи сапропелевого сырья составляет 10,4 тыс. т условной влажности. При

увеличении сменности работ возможно достичь годовой производительности 20 тыс. т. По данным разработчика месторождения, в 2019 г. выручка от реализации сапропеля составила 1150,5 тыс. руб. Затраты на добычу и переработку – 650 тыс. руб. Прибыль по итогам года от реализации сапропеля составила 308,5 тыс. руб., средняя себестоимость продукции из сапропеля – 110,2 руб/т, рентабельность участка – 47,5 %. Рассчитанный за пятилетний период при ставке дисконтирования в размере 10 % коэффициент дисконтирования составил 0,62.

Таблица 1. Расчет чистого дисконтированного дохода для объектов по добыче озерного сапропеля (месторождение в озере Червоное Житковичского района Гомельской области) и сапропеля и торфа (участок «Млынок-2» торфяного месторождения Удховда Пружанского района Брестской области)

Table 1. Calculation of net present value for objects for the extraction of lake sapropel (Chervonoye Lake deposit, Zhitkovichi district, Gomel region) and sapropel and peat (Mlynok-2 site of Udhovda peat deposit, Pruzhany district, Brest region)

Показатель	Объект				
	оз. Червоное	участок «Млынок-2»			
		Вид сырья			
		сапропель	торф	сапропель	торфо-сапропель
Детальная разведка (дата расчетов)	22.12.2020	20.03.2017			
Курс долл. США, руб/1 долл. США на период разведки [23]	2,10	1,88			
Участок первоочередной разработки:					
– площадь, га	160		35		
– средняя мощность, м	2,46	0,80	0,57	1,37	
– естественная влажность, %	91,7	84,5	80,2	82,3	
– условная влажность, %	60,0	40,0	60,0	50,0	
– плотность, т/м³	1,03	0,93	1,09	1,01	
– промышленные запасы, тыс. м³	3948	282	198	481	
– извлекаемые запасы категорий А + В + С ₁ (доказанные), тыс. т	844	102	107	209	
Количество товарной продукции, тыс. т условной влажности/год	10,4	3,0	3,0	6,0	
Расчетный период разработки месторождения, лет	81	35			
Себестоимость:					
– 1 т, руб/т	110,20	19,09	17,12	18,11	
– 1 т, долл. США/т	52,48	10,14	9,09	9,62	
– всего, тыс. руб/год	1143,88	57,27	51,36	108,63	
– всего, тыс. долл. США/год	544,78	30,42	27,28	57,69	
Прибыль, руб./т	52,35	10,91	22,88	16,90	
Рентабельность, %	47,50	57,20	133,60	93,30	
Цена товарной (реализованной) продукции:					
– руб/т	162,55	30,00	40,00	35,00	
– долл. США/т	77,41	15,93	21,24	18,59	
Стоимость товарной продукции:					
– тыс. руб/год	1687,00	90,00	120,00	210,00	
– тыс. долл. США/год	804,00	48,00	64,00	112,00	
Чистый годовой доход (NSR):					
– тыс. руб/год	543,00	33,00	69,00	101,00	
– тыс. долл. США/год	259,00	17,00	36,00	54,00	
– долл. США/т	24,90	5,67	12,00	9,00	
Ставка дисконтирования, %	10				
Период времени, лет	5				
Коэффициент дисконтирования	0,62				
Чистый дисконтированный доход (NPV):					
– тыс. руб/год	334,00	20,00	42,00	62,00	
– тыс. долл. США/год	159,00	11,00	22,00	33,00	
– долл. США/т	15,33	3,56	7,47	5,52	
Инвестиционные затраты (ТИС), тыс. долл. США	675,00	136,00	136,00	272,00	
Накопленный чистый дисконтированный доход (NCF _{сум}), тыс. долл. США/10 лет	8058,00	61,00	835,00	794,00	
Индекс рентабельности (доходности) инвестиций (PI)	1,20	–	–	1,10	
Дисконтируемый срок окупаемости инвестиций (PP)	2,60	–	–	5,10	

На участке «Млынок-2» с 2018 г. ОДО «Агросемпродукт» производится добыча торфа и подстиляющего его сапропеля для сельского хозяйства. Расчеты (см. табл. 1) по данным [21] выполнены исходя из максимальной загрузки основного оборудования по добыче – 3000 т торфа и 3000 т сапропеля.

Расчет чистого дисконтированного дохода при добыче сапропеля без учета условий залегания и соответствующего учета технологических особенностей на основании обобщенной официальной статистической информации Минприроды, которая содержится в агрегированных первичных статистических данных показателей разработки месторождений и первичной переработки (обогащения) полезных ископаемых по форме 1-полезные ископаемые (Минприроды) за 2019 г. [24], приведен в табл. 2.

Таблица 2. Расчет чистого дисконтированного дохода для сапропеля по данным официальной статистической информации (по состоянию на 01.01.2020)

Table 2. Calculation of net present value for sapropel according to official statistical information (as of 01/01/2020)

Показатель	Значение показателя
Количество товарной продукции, т усл. вл/год	18 396
Средневзвешенная отпускная цена единицы с налогом на добавленную стоимость, руб/т	133,36
Средневзвешенная полная себестоимость, руб/т	120,76
Прибыль, руб/т	12,60
Рентабельность, %	10,43
Чистый годовой доход (NSR), тыс. руб.	231,79
Коэффициент дисконтирования	0,62
Курс долл. США, руб/1 долл. США	2,10
Чистый дисконтированный доход (NPV):	
– тыс. руб.	142,55
– тыс. долл. США	67,77
– долл. США/т	3,68

Полученные расчетные данные себестоимости сапропелевой продукции на месторождении в оз. Червоное (110,2 руб/т) сопоставимы с данными Минприроды, заключенными в агрегированных первичных статистических сведениях за 2019 г. (120,76 руб/т) [24], что свидетельствует об обоснованности использованных в расчетах исходных данных.

Следует отметить, что применяемые на исследуемых объектах гидромеханизированный и экскаваторный способы извлечения сапропеля позволяют практически полностью избежать технологических потерь при добыче и считать все балансовые запасы разрабатываемого сапропелевого сырья извлекаемыми.

Выполненная стоимостная оценка типичных месторождений сапропеля показывает, что величина чистого дисконтированного дохода зависит от цены, себестоимости и количества произведенной товарной продукции. Сравнительно высокие объемы производства, повышенный уровень цены на сапропелевой сырье месторождения в оз. Червоное обеспечивают, в конечном итоге, высокий уровень чистого дисконтированного дохода на уровне 15,33 долл. США/т. При совместном освоении месторождения с залежами сапропеля и торфа более высокие значения чистого дисконтированного дохода имеет добыча сапропеля (7,47 руб/т) за счет более высокого уровня цены на данный вид органического сырья. Приведенный к 1 т чистый дисконтированный доход добычи торфа по экскаваторной технологии на смешанном торфо-сапропелевом месторождении незначительно отличается от значений, полученных на основании расчетов для сапропеля, в основе которых использованы данные обобщенной официальной статистической информации Минприроды [24].

Таким образом, для стоимостной оценки запасов наиболее изученных, рентабельных для разработки и подготовленных для освоения сапропелевых месторождений в озерах как элементов НБ необходимо использовать приведенную к 1 т величину чистого дисконтированного дохода, полученную на основании прямых расчетов по репрезентативному месторождению в оз. Червоное Житковичского района, равную 15,33 долл. США/т. Для стоимостной оценки запасов торфо-сапропелевого сырья на торфяных месторождениях необходимо использовать приведенную к 1 т величину чистого дисконтированного дохода, полученную на основании прямых расчетов по репрезентативному торфяному месторождению Удховда Пружанского района (участок «Млынок-2»), равную 5,52 долл. США/т. Приведенные к 1 т величины чистого дохода организаций, добывающих озерный сапропель и сапропель из-под слоя торфа, составляют 24,9 и 9,0 долл. США/т соответственно.

В составленном перечне перспективных для освоения сапропелевых месторождений в озерах и на торфяных болотах 95 объектов (см. табл. 3). Это месторождения, которые могут или уже реально вовлечены в хозяйственную деятельность по причине детально изученных и утвержденных балансовых запасов, имеющейся логистической инфраструктуры для организации разработки сырья по гидромеханизированной или экскаваторной технологии, доказанной в ходе детальной разведки рентабельности и целесообразности освоения имеющихся запасов сапропеля. В списке перспективных для стоимостной оценки в качестве НБ 11 ранее бывших в разработке озерных месторождений с предварительно оцененными запасами сапропеля по категории С₂, однако имеющие наиболее предпочтительные горно-геологические условия залежей и созданную ранее инфраструктуру по добыче и подготовке (сушке) сырья.

Таблица 3. Стоимостная оценка перспективных для освоения запасов сапропеля в составе национального богатства в пределах административных областей Республики Беларусь (по состоянию на 01.01.2024)

Table 3. Valuation of sapropel reserves that are promising for development as part of the National Wealth within the administrative regions of the Republic of Belarus (as of 01/01/2024)

Область	Количество месторождений				Площадь в границе промышленной залежи, га	Балансовые запасы, тыс. т	Стоимость запасов, тыс. долл. США	
	всего (в том числе под торфом)	по категориям запасов		разрабатываемых			по чистому доходу	по дисконтированному доходу
		A	C ₂					
Брестская	18 (2)	15	3	7	722	13 470	246 804	203 315
Витебская	38 (0)	34	4	16	1800	19 733	491 354	304 640
Гомельская	9 (1)	7	2	6	3750	18 570	446 375	276 753
Гродненская	11(2)	9	2	6	280	6287	140 499	87 110
Минская	10 (0)	10	0	6	1083	12 456	310 147	192 291
Могилёвская	9 (1)	9	0	6	403	7403	182 255	112 998
Беларусь	95 (6)	84	11	47	8039	77 919	1 817 435	1 177 107

Выделенные месторождения характеризуются благоприятными социальными и экономическими условиями для коммерческой реализации разработки сапропеля и приемлемые для этого юридические, нормативные и природоохранные условия. Данные месторождения квалифицированы высокой степенью достоверности геологической информации о запасах и возможностью их извлечения в связи с благоприятными горно-геологическими условиями залегания, что подтверждается тем, что 47 озер из данного перечня ранее находились в разработке и в отдельные годы годовая суммарная добыча составляла более 1 млн т [25].

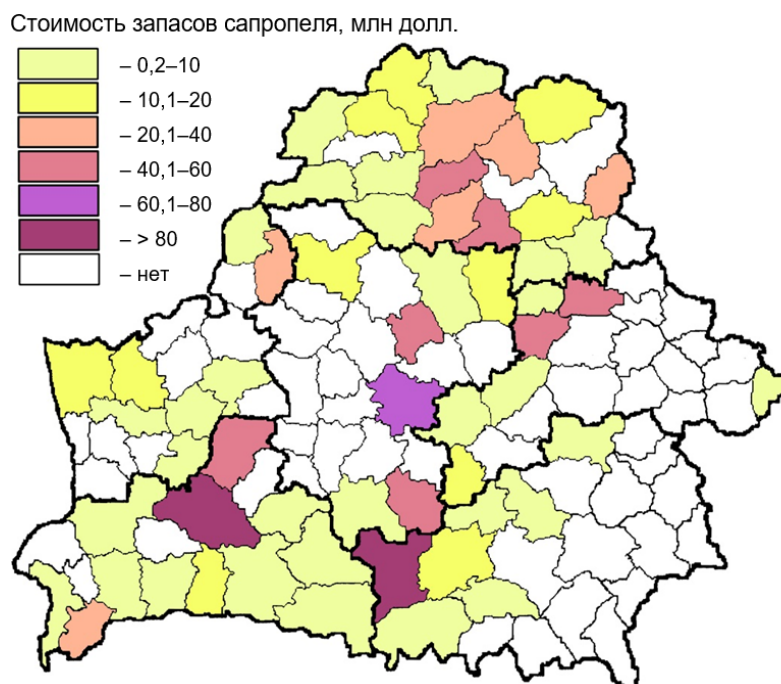
Рассчитанная в пределах административных областей и районов на основе данных о балансовых запасах перспективных месторождений как элементов НБ стоимость ресурсов сапропеля на 01.01.2023 по чистому дисконтированному доходу составляет 1,18 млрд долл. США. Распределение стоимости извлекаемых запасов сапропеля перспективных для освоения месторождений в пределах административных районов республики представлено на рисунке, из которого следует, что примерно в половине административных районах республики стоимость запасов сапропеля, отнесенных к категории НБ, не подсчитана по причине отсутствия разрабатываемых и детально разведанных месторождений с утвержденными запасами сапропелевого сырья.

Наибольшая стоимость запасов сапропеля перспективных для освоения месторождений относится к Житковичскому району Гомельской области за счет огромных запасов в самом крупном водоеме Полесья – оз. Червоное. Общая стоимость запасов сапропеля, отнесенных к категории НБ по чистому дисконтированному доходу, в Житковичском районе составляет около 249 млн долл. США. Высокая стоимость общих запасов сапропеля характерна для Ивацевичского района Брестской области – 92 млн долл. США.

В центральной части республики по стоимости взятых на баланс государства запасов сапропеля выделяются Пуховичский (62 млн долл. США), Смолевичский (56 млн), Барановичский (более 50 млн), Чашникский (50 млн), Любанский (48 млн), Бельничский (45 млн долл. США) административные районы. Следует также отметить районы, расположенные на периферии, со значительной стоимостью детально разведанных запасов сапропеля: Малоритский, Верхнедвинский, Петриковский, Гродненский, Щучинский, Вилейский и др.

Полученные расчетом данные сопоставимы с природным капиталом Беларуси по оценкам Всемирного банка, который составлял 5972 долл. США на душу населения, или около 57 млрд долл. США в валовом выражении [26]. Следует учесть, что характер приведенных выше подсчетов

не позволяет говорить об их достаточной надежности в силу объективных трудностей, связанных с отсутствием полной информации о запасах природных ресурсов, различиями в рыночных ценах на полезные ископаемые и др. Поэтому в тех подсчетах по элементам природного капитала Беларуси фигурировали преимущественно данные по земельным и лесным ресурсам.



Распределение по административным районам Республики Беларусь стоимости запасов сапропеля, отнесенных к категории национального богатства по чистому дисконтированному доходу

Distribution by administrative regions of the Republic of Belarus of the value of sapropel reserves classified as National Wealth by net present value

В настоящее время разрабатывается 10 месторождений сапропеля: в Гомельской области – 4, в Витебской и Гродненской областях – по 2, в Брестской и Минской областях – по 1. На месторождениях Могилёвской области добыча сапропеля в настоящее время не производится. Наилучшими возможностями для расширения добычи сапропеля имеют Витебская и Брестская области, в которых имеется соответственно 38 и 18 перспективных для разработки месторождений с общими балансовыми запасами сапропеля, отнесенных к категории НБ: в Витебской области – 19,73 млн т и Брестской области – 13,47 млн т. Следует отметить, что в 1980–1990 гг. в Витебской области разрабатывали 16 месторождений сапропеля, в Брестской области – 7 месторождений. Также обращает на себя внимание, что в Витебской и Брестской областях большое количество сапропелевых месторождений разведано детально и запасы утверждены по категории А. В настоящее время в Брестской области осваивается месторождение торфо-сапропеля на участке «Дубник-2» Пинского района.

Гомельская и Минская области также отличаются повышенным количеством разведанных балансовых запасов сапропеля. Если в Гомельской области они сосредоточены преимущественно в оз. Червоное Житковичского района, то в Минской области перспективные запасы сапропеля распределены по территории более равномерно. В Минской области детально разведано и подготовлено для освоения 10 озерных месторождений общей площадью 1080 га, на которой сосредоточено 12,46 млн т извлекаемых запасов сапропеля. Все запасы разведаны детально по категории оценки А. В Минской области разрабатывается только одно месторождение для производства лечебных грязей – Судобль Смолевичского района, что недостаточно для области с высоким потенциалом перспективных для отработки запасов сапропеля.

В Гомельской области в настоящее время разрабатывается четыре месторождения сапропеля. Перспективны участки по добыче сапропеля на оз. Червоное (2-й участок – ОАО «Житковичский агротехсервис») и оз. Дикое Петриковского района (ОАО «Петриковский агросервис»), которое ранее разрабатывалось.

В Минской области первоочередными для разработки являются месторождения сапропеля в озерах Радомля Крупского района, Рыбачное Борисовского района, Улла Вилейского района и Вечер

Любанского района. Все месторождения разведаны детально, мелководны, с повышенными запасами балансовых запасов сапропеля. На трех последних месторождениях ранее производилась добыча.

В Гродненской области в настоящее время разрабатывается два месторождения – Дикое Дятловского района (лечебная грязь) и торфяной участок «Бенин» Новогрудского района. Для расширения добычи в качестве перспективных объектов следует отметить ранее разрабатывавшиеся оз. Белое Островецкого района и Антозеро Гродненского, а также детально разведанное в 2021 г. месторождение в оз. Слижовское Мостовского района (ООО «Биосапропель»).

В Могилёвской области нет разрабатываемых в настоящее время месторождений сапропеля. В области выделено девять месторождений сапропеля, запасы которых отнесены к категории НБ. Из них шесть ранее разрабатывались и имеют соответствующую инфраструктуру и благоприятные логистические условия. Для вовлечения сапропеля Могилёвской области в экономический оборот следует рекомендовать к первоочередной разработке ранее освоенные месторождения в озерах Вейно и Неропля Бельничского района, Безымянное Круглянского района и Лочинское Осиповичского района (ООО «ТАПЕН органик»).

Заключение. Стоимостная оценка запасов сапропеля как элемента НБ выполнена на основе доходного метода геолого-экономической оценки месторождений. Разработаны показатели по включению сапропелевых месторождений в перечень для учета в составе НБ: доступность к разработке, детальность геологической изученности, экономическая целесообразность (рентабельность) освоения. Для установления стоимости и чистого дисконтированного дохода (чистой приведенной стоимости) извлекаемых запасов сапропеля использованы методы прямого расчета по данным геолого-экономической оценки детально изученных месторождений сапропеля.

Установлено, что рыночная стоимость запасов сапропеля, отнесенных к НБ Республики Беларусь на 01.01.2024 оценивается в 1,18 млрд долл. США.

Ресурсы сапропеля и других видов общераспространенных полезных ископаемых в структуре НБ выглядят следующим образом. Суммарная стоимость первоочередных для разработки запасов сапропеля в 13 раз меньше, чем рыночная стоимость запасов торфа (15,64 млрд долл. США) перспективных для разработки. Общая стоимость запасов торфа и сапропеля оценивается в 16,82 млрд долл. США, что составляет около 30 % от суммарной стоимости таких элементов природного капитала республики, как земельные и лесные ресурсы, оцененные Всемирным банком в 2005 г. [26].

Рыночная стоимость общих запасов мела республики (1682 млн т) по чистой дисконтированной прибыли при объеме капитальных вложений 300 млн долл. США, годовой добыче мела 2,55 млн т, производстве и реализации 1,7 млн т цемента в год составляет 13,96 млрд долл. США [12], что сопоставимо со стоимостью перспективных для разработки извлекаемых запасов торфа. Стоимость запасов глинистого сырья по всем детально разведанным месторождениям Беларуси в объеме 450 млн т по чистому дисконтированному доходу составляет 2,42 млрд долл. США [12], что соотносится со стоимостью запасов мела, объем которых почти в 4 раза больше.

Для сравнения следует отметить, что рыночная стоимость запасов калийных солей месторождения Старобинское Минской области, разведанных по категории А + В + С₁ в объеме 916,1 млн т (в пересчете на K₂O) по чистому дисконтированному доходу при средней цене реализации продукции 300 долл. США за 1 т, составляет 52,4 млрд долл. США [12]. Общая рыночная стоимость подтвержденных извлекаемых запасов категорий А + В + С₁ всех полезных ископаемых республики на 2012 г. составляет около 825,0 млрд долл. США [12].

Экономическое обоснование запасов полезных ископаемых, в том числе сапропеля, как элементов НБ позволяет выявить направления их рационального использования с применением наукоемких технологий для получения максимального дохода, что обеспечит реализацию мероприятий Программы деятельности Правительства (утверждена Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24.12.2020 № 758) по инвентаризации и вовлечению неэффективно используемых ресурсов и НБ в экономический оборот.

Список использованных источников

1. Степанов, А. Д. К вопросу об оценке национального богатства России, его составных частей [Электронный ресурс] / А. Д. Степанов // Наукоеведение : интернет-журнал. – 2011. – № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik9/9-4.pdf>. – Дата доступа: 22.02.2024.
2. Тарасов, В. Сколько стоит Беларусь / В. Тарасов // Дело. – 2010. – № 9. – С. 26–30.
3. Раскина Ю. В. Статистика природных ресурсов как части национального богатства / Ю. В. Раскина. – СПб. : Изд-во Европейского ун-та, 2010. – 23 с.

4. Бабылев, С. Н. Экономика природопользования / С. Н. Бабылев, А. Ш. Ходжаев. – М. : ИНФРА-М, 2010. – 292 с.
5. Временная типовая методика экономической оценки месторождений полезных ископаемых. – М. : Изд. ГКНТ и Госкомцен СССР, 1980. – 29 с.
6. Неверов, А. В. Природный капитал в системе устойчивого развития / А. В. Неверов, И. П. Деревяго // Белорусский экономический журнал. – 2005. – № 1. – С. 121–133.
7. Экономическая эффективность инновационной деятельности: проблемы, методы и решения / И. В. Войтов [и др.] // Новости науки и технологий. – 2012. – № 2 (20). – С. 34–45.
8. Неверов, А. В. Экономическая и эколого-экономическая оценка минеральных ресурсов: методология и методика / А. В. Неверов, Т. П. Водопьянова // Природные ресурсы. – 2004. – № 2. – С. 90–99.
9. Томашевич, А. В. Экономическая оценка геостратегических ресурсов Беларуси: проблемы и решения / А. В. Томашевич, А. В. Унукович, В. М. Яцухно // Природные ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 98–109.
10. Шимова, О. С. Экономика природопользования / О. С. Шимова, Н. К. Соколовский. – Минск : БГЭУ, 2005. – 356 с.
11. Унукович, А. В. Оценка экономической эффективности использования ресурсов торфяных месторождений / А. В. Унукович, Я. И. Аношко // Природные ресурсы. – 2011. – № 2. – С. 110–118.
12. Унукович, А. В. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых Беларуси / А. В. Унукович, Я. И. Аношко ; науч. ред. А. К. Карабанова. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 455 с.
13. Макконнелл, К. Р. Экономика: принципы, проблемы и политика : в 2-х т. / К. Р. Макконнелл, С. Л. Брю. – М. : Республика, 1992. – Т. 2. – 400 с.
14. Долан, Э. Д. Рынок: микроэкономическая модель : [пер. с англ.] / Э. Д. Долан, Д. Е. Линдсей. – СПб. : Печатный двор, 1992. – 496 с.
15. Вельмер, Ф. В. Экономические оценки месторождений / Ф. В. Вельмер. – Киев : Логос, 2001. – 108 с.
16. Дергачев, А. П. Финансово-экономическая оценка минеральных месторождений / А. П. Дергачев, Дж. Хилл, Л. Д. Казаченко. – М. : Издательство МГУ, 2000. – 176 с.
17. Правила стоимостной оценки месторождений полезных ископаемых : ТКП 17.04-08-2008 (02120). – Минск : Минприроды, 2009. – 36 с.
18. Порядок проведения экономической оценки природно-ресурсного потенциала административно-территориальной единицы (района) // Охрана окружающей среды и природопользование : ТКП 17.02-15-2016. – Минск : Минприроды, 2016. – 14 с.
19. Система национальных счетов 2008. Комиссия европейских сообществ, Международный валютный фонд, Организация экономического сотрудничества и развития, ООН, Всемирный банк. – Нью-Йорк, 2009. – 1235 с.
20. Гайдукевич, О. М. Отчет о детальной разведке сапропеля в восточной части озера Червоное Житковичского района Гомельской области с подсчетом запасов по состоянию на 22.12.2019 / О. М. Гайдукевич. – Минск, 2020. – 109 с.
21. Гайдукевич, О. М. Отчет о доразведке торфа и сапропеля на участке «Млынок-2» торфяного месторождения Удходва Пружанского района Брестской области с подсчетом запасов по состоянию на 20.03.2017 / О. М. Гайдукевич. – Минск, 2017. – 153 с.
22. О некоторых мерах по реализации Кодекса Республики Беларусь о недрах [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 дек. 2008 г., № 2045 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 22.11.2022.
23. Официальный курс белорусского рубля по отношению к иностранным валютам, устанавливаемый Национальным банком Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный банк Республики Беларусь, 2000–2022. – Режим доступа: <https://www.nbrb.by/statistics/rates/ratesdaily.asp>. – Дата доступа: 24.11.2022.
24. Агрегированные первичные статистические данные показателей разработки месторождений и первичной переработки (обогащения) полезных ископаемых по форме 1-полезные ископаемые (Минприроды) за 2019 г. [Электронный ресурс] // Официальная статистическая информация Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды. – Режим доступа: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/statistika/>. – Дата доступа: 24.11.2022.
25. Курзо, Б. В. Закономерности формирования и проблемы использования сапропеля / Б. В. Курзо. – Минск : Беларуская навука, 2005. – 224 с.
26. Долинина, Т. Н. Национальное богатство Республики Беларусь: концептуальные подходы к оценке / Т. Н. Долинина // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. – Минск : БГТУ, 2017. – № 1 (196). – С. 20–28.

References

1. Stepanov A. D. *K voprosu ob otsenke natsional'nogo bogatstva Rossii, yego sostavnykh chastey* [On the issue of assessing the National Wealth of Russia, its components]. *Naukovedeniye. Elektronnyy zhurnal = Scientific studies. Electronic journal*, 2011, no. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/sbornik9/9-4.pdf> (accessed 22 February 2024). (in Russian)
2. Tarasov V. *Skol'ko stoit Belarus* [How much is Belarus]. *Delo = Business*, 2010, no 9, pp. 26–30. (in Russian)
3. Raskina Y. V. *Statistika prirodnikh resursov kak chasti natsional'nogo bogatstva* [Statistics of natural resources as part of National Wealth]. St. Petersburg, European University Publ., 2010, 23 p. (in Russian)

4. Babylev S. N., Khodzhayev A. S. *Ekonomika prirodopol'zovaniya* [Economics of environmental management]. Moscow, INFRA-M Publ., 2010, 292 p. (in Russian)
5. *Vremennaya tipovaya metodika ekonomicheskoy otsenki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Temporary standard methodology for economic assessment of mineral deposits]. Moscow, State Committee for Science and Technology and the State Committee of Prices of the USSR Publ., 1980, 29 p. (in Russian)
6. Neverov A. V., Derevyago I. P. *Prirodnyy kapital v sisteme ustoychivogo razvitiya* [Natural capital in the system of sustainable development]. *Belorusskiy ekonomicheskii zhurnal = Belarusian Economic Journal*, 2005, no.1, pp. 121–133. (in Russian)
7. Voytov I. V., Gatikh M. A., Unukovich A. V., Anoshko Y. I. *Ekonomicheskaya effektivnost' innovatsionnoy deyatel'nosti: problemy, metody i resheniya* [Economic efficiency of innovation activity: problems, methods and solutions]. *Novosti nauki i tekhnologii = News of Science and Technology*, 2012, no. 2 (20), pp. 34–45. (in Russian)
8. Neverov A. V., Vodop'yanova T. P. *Ekonomicheskaya i ekologo-ekonomicheskaya otsenka mineral'nykh resursov: metodologiya i metodika* [Economic and ecological-economic assessment of mineral resources: methodology and methodology]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2004, no. 2, pp. 90–99. (in Russian)
9. Tomashevich A. V., Unukovich A. V., Yatsukhno V. M. *Ekonomicheskaya otsenka geostrategicheskikh resursov Belarusi: problemy i resheniya* [Economic assessment of geostrategic resources of Belarus: problems and solutions]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2007, no. 3, pp. 98–109. (in Russian)
10. Shimova O. S., Sokolovskiy N. K. *Ekonomika prirodopol'zovaniya* [Environmental economics]. Minsk, Belarusian State University of Economics Publ., 2005, 356 p. (in Russian)
11. Unukovich A. V., Anoshko Y. I. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya resursov torfyanykh mestorozhdeniy* [Assessing the economic efficiency of using peat deposit resources]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2011, no. 2, pp. 110–118. (in Russian)
12. Unukovich A. V., Anoshko Y. I. *Geologo-ekonomicheskaya otsenka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Belarusi* [Geological and economic assessment of mineral deposits in Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2012, 455 p. (in Russian)
13. Makkonell K. R., Bryu S. L. *Ekonomika: printsipy, problemy i politika: v 2 t.* [Economics: principles, problems and politics]. In 2nd vol. Moscow, Respublika Publ., 1992, vol. 2, 400 p. (in Russian)
14. Dolan E. D., Lindsey D. E. *Rynok: mikroekonomicheskaya model'* [Market: a microeconomic model]. St. Petersburg, Pechatnyy Dvor Publ., 1992, 496 p. (in Russian)
15. Velmer F. V. *Ekonomicheskiye otsenki mestorozhdeniy* [Economic assessments of deposits]. Kyiv, Logos Publ., 2001. 108 p. (in Russian)
16. Dergachev A. P., Khill D., Kazachenko L. D. *Finansovo-ekonomicheskaya otsenka mineral'nykh mestorozhdeniy* [Financial and economic assessment of mineral deposits]. Moscow, Moscow State University Press, 2000, 176 p. (in Russian)
17. TKP 17.04-08-2008 (02120). *Pravila stoimostnoy otsenki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Technical code of (established) practice 17.04-08-2008 (02120). Rules for the valuation of mineral deposits]. Minsk, 2009. 36 p. (in Russian)
18. TKP 17.02-15-2016. *Poryadok provedeniya ekonomicheskoy otsenki prirodno-resursnogo potentsiala administrativno-territorial'noy yedinit'sy (rayona)* [Technical code of (established) practice 17.02-15-2016. The procedure for conducting an economic assessment of the natural resource potential of an administrative-territorial unit (district)]. Minsk, 2016, 14 p. (in Russian)
19. *Sistema natsional'nykh schetov 2008. Komissiya yevropeyskikh soobshchestv, Mezhdunarodnyy valyutnyy fond, Organizatsiya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya, OON, Vsemirnyy bank* [System of National Accounts 2008. Commission of the European Communities, International Monetary Fund, Organization for Economic Co-operation and Development, UN, World Bank]. New York, 2009, 1235 p. (in Russian)
20. Gaydukevich O. M. *Otchet o detal'noy razvedke sapropelya v vostochnoy chasti ozera Chervonoye Zhitkovichskogo rayona Gomel'skoy oblasti* [Report on detailed exploration of sapropel in the eastern part of Lake Chervonoye, Zhitkovichi district, Gomel region]. Minsk, 2020, 109 p. (in Russian)
21. Gaydukevich O. M. *Otchet o dorazvedke torfa i sapropelya na uchastke "Mlynok-2" torfyanogo mestorozhdeniya Udkhodva Pruzhanskogo rayona Brestskoy oblasti.* [Report on additional exploration of peat and sapropel at the Mlynok-2 site of the Udkhodva peat deposit, Pruzhany district, Brest region]. Minsk, 2017, 153 p. (in Russian)
22. *Postanovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus' "O nekotorykh merakh po realizatsii Kodeksa Respubliki Belarus' o nedrakh"* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus "On some measures to implement the Code of the Republic of Belarus on Subsoil"]. No. 2045. December 30, 2008. Online portal of the Republic of Belarus. Available at: <http://www.pravo.by> (accessed 22 February 2024). (in Russian)
23. *Ofitsial'nyy kurs belorusskogo rublya po otnosheniyu k inostrannym valyutam. Natsional'nyy bank Respubliki Belarus'* [The official exchange rate of the Belarusian ruble against foreign currencies. National Bank of the Republic of Belarus]. Available at: <https://www.nbrb.by/statistics/rates/ratesdaily.asp> (accessed 22 November 2022). (in Russian)
24. *Agregirovannyye pervichnyye statisticheskiye dannyye pokazateley razrabotki mestorozhdeniy i pervichnoy pererabotki (obogashcheniya) poleznykh iskopayemykh po forme 1-poleznyye iskopayemye (Minprirody) za 2019 g. Ofitsial'naya statisticheskaya informatsiya Ministerstva prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy* [Aggregated primary statistical data on indicators of deposit development and primary processing (enrichment) of minerals in form 1-mineral resources (Ministry of Natural Resources) for 2019. Official statistical information of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection]. Available at: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/statistika/> (accessed 24 November 2022). (in Russian)

25. Kurzo B. V. *Zakonomernosti formirovaniya i problemy ispol'zovaniya sapropelya* [Patterns of formation and problems of using sapropel]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2005, 224 p. (in Russian)
26. Dolinina T. N. *Natsional'noye bogatstvo Respubliki Belarus': kontseptual'nyye podkhody k otsenke* [National Wealth of the Republic of Belarus: conceptual approaches to evaluation]. *Trudy BGTU. Ser. 5. Ekonomika i upravleniye = Proceedings of BSTU. Series 5. Economics and management*. Minsk, 2017, no. 1 (196), pp. 20–28. (in Russian)

Информация об авторах

Гайдукевич Олег Михайлович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olek2008@tut.by

Курзо Борис Валентинович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

Сорокин Александр Иванович – кандидат технических наук, заместитель директора, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: a.sorokin50@mail.ru

Information about authors

Oleg M. Gaidukevich – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: olek2008@tut.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

Alexander I. Sorokin – Ph. D. (Technical), Deputy Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (F. Skorina St., 10, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: a.sorokin50@mail.ru

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-137-143>
УДК 665.772:662.813

Поступила в редакцию 18.03.2024
Received 18.03.2024

УТИЛИЗАЦИЯ НЕФТЕШЛАМОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА С ТОРФОМ

В. М. Дударчик, В. М. Крайко, Е. В. Ануфриева

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен способ утилизации углеводородсодержащих отходов переработки нефтепродуктов пиролизом их смесей с торфом в подвижном и стационарном слоях с получением жидких и газообразных продуктов и снижением выбросов экологически опасных загрязняющих веществ.

Установлено, что в зависимости от условий проведения процесса пиролиза можно получать различный целевой продукт. При пиролизе смесей торфа с нефтешламами в стационарном слое (при скорости нагрева 8 °C/мин) наибольшая энергетическая продуктивность достигается за счет получения жидкой смолы (выход составляет 40–55 %). В то же время среднескоростной (30–40 °C/мин) пиролиз в подвижном слое дает возможность получать большую энергетическую продуктивность за счет газовой составляющей (выход газа – 65–70 %). Таким образом, сравнительный анализ результатов пиролиза показал, что пиролиз в подвижном слое целесообразнее применять для получения газообразных продуктов, в стационарном слое – для получения жидкой смолы.

Увеличение добавки парафинсодержащих отходов к торфу при пиролизе в стационарном слое вызывает значительный рост жидкой фракции (до 67 % от исходного торфа). Также изменяется качественный состав пиролизного газа, происходит рост содержания непредельных углеводородов и метана, что приводит к увеличению теплоты сгорания пиролизного газа по сравнению с исходным торфом.

Полученные результаты по пиролизу смесевых композиций на основе нефтешламов (два вида) и торфа показали, что указанный способ их утилизации можно оценить как приемлемый в плане получения жидких и газообразных энергоносителей, однако в плане баланса затрат, экономических показателей и других факторов он требует серьезного дополнительного изучения.

Ключевые слова: торф; нефтяные шламы; пиролиз; термодеструкция; смесевые композиции; смола; пиролизный газ; теплота сгорания.

Для цитирования. Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В. Утилизация нефтешламов методом пиролиза с торфом // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 137–143.

UTILISATION OF OIL SLUDGE BY PYROLYSIS WITH PEAT METHOD

V. M. Dudarchik, V. M. Kraiko, A. V. Anufrieva

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

Abstract. The method of the utilisation of the hydrocarbon-containing wastes of oil products refining by the pyrolysis of their mixtures with peat in mobile and stationary layers with liquid and gaseous products obtaining and the reduction of the ecologically dangerous emissions of pollutants is proposed.

It is established that depending on the conditions of pyrolysis process it is possible to obtain different target product. At the pyrolysis of the mixtures of peat with oil sludge in a stationary layer (at heating rate of 8 °C/min) the greatest energy productivity is achieved by liquid tar obtaining (output is 40–55 %). At the same time, medium-speed (30–40 °C/min) pyrolysis in a moving bed makes it possible to obtain greater energy productivity due to the gas component (gas output – 65–70 %). Thus, the comparative analysis of pyrolysis results showed that pyrolysis in a moving layer is more appropriate for gaseous products obtaining, in a stationary layer – for liquid tar obtaining.

An increase in the addition of paraffin-containing waste to peat during pyrolysis in the stationary lawyer leads to a significant increase in the liquid fraction (up to 67 % of the initial peat). The qualitative composition of pyrolysis gas also changes, the content of unsaturated hydrocarbons and methane increases, which leads to an increase in the heat of the combustion of pyrolysis gas compared to the original peat.

The obtained results on the pyrolysis of mixed compositions on the base of oil sludge (two types) and peat have shown that the specified method of their utilisation can be estimated as acceptable in terms of liquid and gaseous energy carriers obtaining, but in terms of the balance of costs, economic indicators and other factors still requires serious additional study.

Keywords: peat; oil sludge; pyrolysis; thermo-destruction; mixed compositions; tar; pyrolysis gas; heat of combustion.

For citation. Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Anufrieva A. V. Utilisation of oil sludge by pyrolysis with peat method. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 137–143.

Введение. Загрязнение окружающей среды нефтяными шламами в настоящее время является одной из наиболее экологоопасных и быстрорастущих проблем, особенно для нефтедобывающих стран. Не менее серьезно эта проблема также стоит и перед странами, активно перерабатывающими нефть, что характерно для Беларуси, в результате чего также накапливаются большие объемы специфических отходов, требующих утилизации.

Нефтяной шлам – это жидкие, пастообразные или твердые отходы, представляющие собой смесь нефти (нефтепродуктов), твердой фазы (частиц грунта и почвы) и воды. Источники образования шламов – процессы добычи углеводородного сырья (образуются буровые шламы, которые размещаются в шламовых амбарах), объекты хранения и переработки нефти и нефтепродуктов (шлам или сточные воды хранятся в отстойниках), а также аварийные разливы (образуются «замазученные» грунты). В любом случае такие шламы рассматривают как отходы и источник проблем, связанных с необходимостью заниматься их утилизацией.

Согласно мониторинговым исследованиям Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, только поверхностных загрязнений нефтешламами (в основном это кислые гудроны, смеси вязких обводненных нефтепродуктов, нефтешламовые отложения и продукты попутной переработки нефти) имеется в объеме более 3,5 млн т.

В качестве основных методов обезвреживания и утилизации нефтеотходов практически используются физические, химические, биохимические, физико-химические, термические, комбинированные методы (основанные на сочетании ранее перечисленных методов) [1, 2].

Основным термическим методом утилизации является сжигание [3]. Условия осуществления технологического процесса: $t = 800\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, избыток кислорода. В качестве соответствующего оборудования используют камерные, барботажные, шахтные установки с кипящим слоем и вращающиеся печи. Недостатком способа является отсутствие возможности использования для переработки отходов, содержащих фосфор, галогены, серу. В этом случае могут образовываться продукты реакции, например, диоксины и фураны, по токсичности во много раз превышающие нормативы.

Химический метод разделения [4] основан на использовании растворителей. Для диспергирования нефтешламов применяют низкокипящие парафиновые углеводороды, например, *n*-гексан, широкую фракцию легких углеводородов, газовый конденсат и некоторые другие. К недостаткам метода относятся применение специального технологического оборудования и высокий расход дефицитных и дорогостоящих органических растворителей.

Биологический метод [5] осуществляют путем использования специальных штаммов бактерий, биогенных добавок и подачи воздуха. Процесс характеризуется достаточно простым аппаратным оформлением и экологически безопасен. Недостатки метода: малая производительность; высокая затратность; невозможность реализации при низких температурах.

При переработке физико-химическими методами [6] нефтешламы предварительно разогревают, разрушают водонефтяную эмульсию и утилизируют каждый полученный компонент. Обработанный нефтешлам поступает затем на двухфазную центрифугу, в которой под влиянием центробежных сил он дополнительно очищается от взвеси механических частиц. Очищенный фугат из центрифуги в напорном режиме пропускается через самоочищающийся фильтр, оборудованный акустической системой, и поступает в трехфазный саморазгружающийся центробежный сепаратор с выделением нефти и воды. Недостатками метода являются высокая стоимость используемых реагентов и неприемлемость для труднорасслаиваемых высоковязких нефтешламов с повышенным содержанием парафинов и асфальтенов.

Центрифугирование на деканторах [7–9] обычно проводят через две последовательные стадии. На первой стадии отделяется основная часть твердых частиц. Грубые механические примеси выводятся из аппарата в виде твердого остатка. Жидкая фаза, состоящая из нефти и воды (и минимального количества механических примесей) поступает на вторую ступень очистки. На трехфазной тарельчатой

центрифуге происходит разделение смеси на нефть, воду и механические примеси. Недостатки предлагаемого метода: повышенные требования к используемым реагентам; необходимость постоянного состава сырья; сложное аппаратное оформление процесса.

Термические методы переработки нефтешламов по сравнению с физическими, химическими, физико-химическими и биологическими методами обладают рядом преимуществ, таких как отсутствие дорогостоящих стадий разделения; возможность переработки сырья с высокой зольностью; отказ от использования растворителей и микроорганизмов; отсутствие отходов и продуктов, требующих утилизации (фильтрующие элементы, гидрофобные капсулированные продукты и т. п.). Каталитический пиролиз нефтешламов [10] является одним из наиболее перспективных термических методов, так как позволяет получать ценные газообразные и жидкие продукты для химической и энергетической промышленности. Использование катализаторов в процессе пиролиза позволяет снизить температуру процесса, увеличить степень конверсии нефтешламов, а также выход газообразных и жидких продуктов. Кроме того, катализаторы могут существенно повлиять на химический состав жидких продуктов пиролиза, повышая выход ароматических и алкилароматических углеводородов, что особенно ценно при переработке тяжелой нефти. Катализаторы на основе хлоридов металлов проявляют высокую активность в процессах термодеструкции органического сырья. Пиролиз нефтешламов в присутствии хлоридов металлов является перспективным направлением исследований.

Результаты и их обсуждение. Цель работы – провести оценку возможности утилизации углеводородсодержащих отходов в смеси с торфом методом пиролиза в подвижном и стационарном слоях с получением жидких и газообразных продуктов и снижением экологоопасных выбросов загрязняющих веществ.

В состав компонентов смесевых композиций включили торф низинный ($W = 8,9\%$; $A^c = 2,0\%$); бурые угли (Бриневское месторождение); твердые отходы переработки нефтепродуктов (парафин, парафиновый гач) ОАО «Завод горного воска» (ОЗГВ), а также нефтешламовые отходы ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» (Мозырский НПЗ). Основными компонентами ОЗГВ являются *n*-парафины и их изомеры с числом «С» от 20 до 44; температура плавления $53\text{ }^{\circ}\text{C}$; содержание воды – следы. Нефтешламы Мозырского НПЗ представляют собой твердые отложения на внутренних стенках нефтеловушек, в состав которых входят в основном асфальтены, карбоиды, парафины.

Для проведения серии опытов по влиянию компонентов смесевых топлив на качественные показатели продуктов пиролиза в подвижном слое была использована лабораторная установка с горизонтально расположенной ретортой и встроенным шнеком для перемещения пиролизуемого сырья.

При анализе результатов пиролиза в подвижном слое (скорость нагрева – $30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) при $700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ двухкомпонентных смесей торфа и бурого угля с углеводородсодержащими ОЗГВ важное значение имеют выход, состав и теплота сгорания газа. Установлено, что с повышением температуры от $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в газе пиролиза смеси бурого угля и торфа снижается содержание диоксида углерода и непредельных углеводородов, растет доля метана и водорода, теплота сгорания газа составляет $3615\text{ ккал}/\text{м}^3$. Сумма компонентов синтез-газа при этом составляет не менее 70% , что позволяет использовать такой газ после удаления диоксида углерода для каталитического синтеза углеводородов и спиртов.

В бинарной смеси (торф + углеводородсодержащие отходы) с повышением концентрации отходов от 10 до 30% при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в газе растет содержание углеводородов и, соответственно, теплота сгорания, достигающая порядка $5000\text{ ккал}/\text{м}^3$.

Таким образом, пиролиз в подвижном слое смесевых образцов торфа и углей при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет получать пиролизный газ с концентрацией компонентов синтез-газа, достигающей 70% . При пиролизе в тех же условиях смеси торфа и углеводородсодержащих отходов в составе газа пиролиза растет содержание непредельных углеводородов и метана, содержание водорода снижается, а сумма монооксида углерода и водорода (синтез-газ) составляет не более 60% . При этом за счет увеличения доли более калорийной составляющей непредельных углеводородов и метана суммарное значение теплоты сгорания газа существенно возрастает.

Также проведен пиролиз двухкомпонентных смесей парафинсодержащих отходов с торфом и бурыми углями в подвижном слое при разных соотношениях компонентов и исследован состав продуктов пиролиза. Полученные данные сведены в табл. 1. Показано, что увеличение доли парафинсодержащих отходов в смеси приводит к росту содержания углеводородов в пиролизном газе, увеличивает его теплоту сгорания и выход.

Так, при увеличении содержания в пиролизной смеси углеводородсодержащих отходов с 10 до 30% растет выход газа на 8% для торфа и на 20% для бурого угля, а теплота сгорания полученного горючего газа возрастает на 20 и 30% соответственно (см. табл. 1).

Термическое разложение проводили также на установке стационарного пиролиза при различных параметрах – температуре и соотношении компонентов. Качество получающихся продуктов пиролиза

(смола, твердый остаток и пиролизный газ) оценивали по их составу, балансу и энергетическим характеристикам (теплота сгорания газа). Методика приготовления образцов для исследования заключалась в следующем: торф, пропущенный через шнековый аппарат во влажном состоянии, просушенный до воздушно-сухого, в виде небольших гранул подвергался в дальнейшем термическому разложению до необходимой температуры при средней скорости нагрева примерно 8 °С/мин (исходный образец). Образцы смесевых композиций готовили путем механического смешивания подготовленного торфа с измельченными образцами (до 2–4 мм) нефтешламов до однородного состава.

Таблица 1. Выход и состав продуктов пиролиза в подвижном слое смесей парафинсодержащих отходов с торфом и бурыми углями, $T = 800\text{ °C}$

Table 1. Yield and composition of pyrolysis products in the mobile layer of mixtures of paraffin-containing waste with peat and lignite, $T = 800\text{ °C}$

Состав пиролизной смеси	Выход, %		Состав газа, об. %					d , г/л	Q , ккал/м ²
	кокса	газа	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄		
Торф + 10 % ОЗГВ	34,3	65,7	16,7	8,5	26,2	33,5	15,2	0,9218	4125
Торф + 20 % ОЗГВ	30,4	69,6	14,1	8,6	26,4	34,3	16,6	0,8864	4295
Торф + 30 % ОЗГВ	29,2	70,8	11,9	12,8	22,5	32,5	20,4	0,8814	5029
Бурый уголь + 10 % ОЗГВ	54,4	45,6	12,7	6,9	26,6	37,9	15,8	0,8343	4095
Бурый уголь + 20 % ОЗГВ	45,5	54,5	12,7	10,2	21,7	37,1	18,2	0,8388	4580
Бурый уголь + 30 % ОЗГВ	45,1	54,9	11,2	14,8	19,0	32,0	23,1	0,8727	5420

Пиролиз проводили при температурах 600 °С, 700 °С и 800 °С. Для каждой температуры соотношение компонентов составляло 10, 20 и 30 весовых частей нефтешлама и 90, 80 и 70 весовых частей торфа соответственно.

Выход и состав продуктов пиролиза смесевых композиций ОЗГВ с торфом при температуре 700 °С представлены в табл. 2.

Таблица 2. Выход и состав продуктов пиролиза в стационарном слое смесей парафинсодержащих отходов с торфом, $T = 700\text{ °C}$

Table 2. Yield and composition of pyrolysis products in a stationary bed of mixtures of paraffin-containing waste with peat, $T = 700\text{ °C}$

Состав пиролизной смеси	Выход продуктов пиролиза, %			Состав газа, об. %					d , г/л	Q , ккал/м ²
	смолы	кокса	пиролизного газа	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄		
Торф исх.	33,1	39,4	27,5	49,4	0,8	17,1	15,6	17,1	1,1273	2493
Торф + 10 вес. ч. ОЗГВ	39,0	37,3	23,7	35,9	0,9	19,4	24,2	19,6	1,3382	3005
Торф + 20 вес. ч. ОЗГВ	44,6	31,9	23,5	33,0	1,2	18,8	27,6	19,4	1,0677	3104
Торф + 30 вес. ч. ОЗГВ	55,2	29,2	14,9	47,4	1,4	18,8	14,1	18,3	1,3855	2949

По выходу продуктов пиролиза отмечается четкая тенденция увеличения жидкой фракции (смолы) в зависимости от количества нефтешлама в исходной смеси. Из данных табл. 2 видно, что добавка нефтешлама к торфу в количестве 10, 20 и 30 весовых частей увеличивает выход смолы на 18, 35 и 67 % соответственно. В то же время выход коксозольной части с ростом количества добавки нефтешлама уменьшается на 5, 19 и 24 % соответственно.

С целью более детального изучения продуктов термодеструкции двухкомпонентных смесевых композиций был определен качественный и количественный состав исследованных образцов пиролизного газа, рассчитаны их теплоты сгорания.

Как было показано выше (см. табл. 2), увеличение добавки ОЗГВ к торфу при пиролизе в стационарном слое приводит к значительному росту жидкой фракции (до 67 % от исходного торфа). Что касается пиролизного газа, то определенной зависимости его выхода от количества добавки ОЗГВ не обнаружено. В то же время, как видно из данных табл. 2, пиролиз в стационарном слое смеси торфа и углеводородсодержащих отходов приводит к изменению качественного состава пиролизного

газа. Так, происходит рост содержания непредельных углеводородов и метана, что приводит к увеличению теплоты сгорания пиролизного газа по сравнению с исходным торфом.

Результаты экспериментов пиролиза в стационарном слое смесевых различных соотношений торфа и нефтешламов Мозырского НПЗ при температурах 600 °С, 700 °С и 800 °С представлены в табл. 3.

По выходу продуктов пиролиза смесей торфа и нефтешламов наблюдается незначительный рост жидких и газообразных продуктов с ростом температуры пиролиза и количества добавки нефтешлама.

При сравнении выходов продуктов пиролиза двух исследованных типов шламов отмечается более низкое содержание жидкой фракции у нефтешлама Мозырского НПЗ, чем у нефтешлама ОЗГВ, что в общем предсказуемо.

Таблица 3. Выход и состав продуктов пиролиза в стационарном слое смесей нефтешламов с торфом

Table 3. Yield and composition of pyrolysis products in the stationary bed of mixtures of oil sludge with peat

Состав пиролизной смеси	T, °C	Выход продуктов пиролиза, %			Состав газа, об. %					d, г/л	Q, ккал/м ²
		смола	кокс	пиролиз- ный газ	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄		
Торф исх.	700	33,1	39,4	27,5	56,6	1,3	13,7	10,6	17,8	1,4452	2384
Торф + 10 вес. ч. нефтешлама	600	32,0	51,5	16,5	61,8	1,6	14,4	10,2	12,0	1,5198	1948
Торф + 20 вес. ч. нефтешлама	600	32,8	45,4	21,8	53,2	1,3	13,9	13,2	18,4	1,3876	2511
Торф + 30 вес. ч. нефтешлама	600	35,4	46,7	17,9	46,7	1,8	16,1	20,0	15,4	1,2787	2566
Торф + 10 вес. ч. нефтешлама	700	34,0	38,6	27,4	32,7	1,1	17,8	28,2	20,2	1,0546	3140
Торф + 20 вес. ч. нефтешлама	700	29,2	43,6	27,2	38,4	1,6	14,9	25,2	19,9	1,1340	3018
Торф + 30 вес. ч. нефтешлама	700	35,4	43,1	21,5	23,0	0,9	32,6	30,3	13,2	0,9974	3017
Торф + 10 вес. ч. нефтешлама	800	33,8	39,5	26,7	23,0	0,9	32,6	30,3	13,2	0,9974	3017
Торф + 20 вес. ч. нефтешлама	800	32,9	39,9	27,2	24,6	1,1	28,8	31,1	14,3	0,9939	3051
Торф + 30 вес. ч. нефтешлама	800	36,8	41,0	22,2	16,3	1,3	54,2	19,5	8,7	1,0982	3073

При анализе результатов пиролиза в стационарном слое при температуре 600–800 °С двухкомпонентных смесей торфа и нефтешламов Мозырского НПЗ важное значение имеют выход, состав и теплота сгорания газа (см. табл. 3). Установлено, что с повышением температуры от 600 до 800 °С в составе газа пиролиза смесей снижается содержание диоксида углерода и непредельных углеводородов, растёт доля метана и водорода, теплота сгорания газа достигает 3140 ккал/м³. Сумма монооксида углерода и водорода (синтез-газ) при этом возрастает от 24 % при 600 °С до 73 % при 800 °С и добавке 30 вес. ч. нефтешлама. Как известно, синтез-газ можно использовать после удаления диоксида углерода для каталитического синтеза углеводородов и спиртов.

Состав продуктов пиролиза при проведении эксперимента на установке со стационарным слоем (см. табл. 2) существенно отличается от продуктов, полученных на установке в подвижном слое (см. табл. 1). Так, в подвижном слое при температуре 700–800 °С основной продукт пиролиза смесей торфа с нефтешламами – пиролизный газ (65–70 %) и кокс (30–35 %). В стационарном же слое при 700 °С пиролиз смесевых составов торф и нефтешламы приводит к получению жидких продуктов (40–55 %), коксозольного остатка (29–37 %) и пиролизного газа (15–24 %).

Закключение. Предложен способ утилизации углеводородсодержащих отходов переработки нефтепродуктов пиролизом их смесей с торфом в подвижном и стационарном слоях с получением жидких и газообразных продуктов и снижением экологически опасных выбросов загрязняющих веществ. В качестве смесевых компонентов предлагается использовать торф и нефтешламы на примере отходов ОАО «Завод горного воска» и ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод».

На основе данных по пиролизу указанных смесей, выходу и анализу получаемых продуктов установлено:

1. Увеличение добавки парафинсодержащих отходов к торфу при пиролизе в стационарном слое приводит к значительному росту жидкой фракции (до 67 % от исходного торфа). Также изменяется качественный состав пиролизного газа, происходит рост содержания непредельных углеводородов и метана, что приводит к увеличению теплоты сгорания пиролизного газа по сравнению с исходным торфом.

2. С повышением температуры от 600 °С до 800 °С в составе газа пиролиза смесей торфа и нефтешламов Мозырского НПЗ снижается содержание диоксида углерода и непредельных углеводородов, растёт доля метана и водорода, теплота сгорания газа достигает 3140 ккал/м³.

3. Сумма монооксида углерода и водорода (синтез-газ) при этом растёт от 24 % при 600 °С до 73 % при 800 °С и добавке 30 вес. ч. нефтешлама.

4. В зависимости от условий проведения процесса пиролиза можно получать различный целевой продукт. При пиролизе смесей торфа с нефтешламами в стационарном слое (при скорости нагрева 8 °С/мин) наибольшая энергетическая продуктивность достигается за счет получения жидкой смолы (выход газа – 40–55 %). В то же время среднескоростной (30–40 °С/мин) пиролиз в подвижном слое дает возможность получать большую энергетическую продуктивность за счет газовой составляющей (выход газа – 65–70 %). Таким образом, сравнительный анализ результатов пиролиза в подвижном и стационарном слоях показал, что подвижный слой целесообразнее применять для получения газообразных продуктов, а стационарный слой предпочтителен для получения жидкой смолы.

5. Полученные результаты по пиролизу смесевых композиций на основе нефтешламов (два вида) и торфа показали, что указанный способ утилизации экологически опасных канцерогенных отходов можно оценить как приемлемый в плане получения жидких и газообразных энергоносителей, но в плане баланса затрат, экономических показателей и других факторов он требует серьезного дополнительного изучения.

Список использованных источников

1. Экологические аспекты получения изомасляной кислоты / Э. Н. Абдрахманова [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – № 3. – С. 18–21.
2. Аминова, А. С. Использование нефтешламов – рациональный способ их утилизации / А. С. Аминова, С. А. Гайбуллаев, К. А. Джураев // Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 2. – С. 124–126.
3. Бибииков, Г. Г. Переработка и обезвреживание нефтешламов НПЗ и НХК / Г. Г. Бибииков, Ю. С. Бердин, А. Г. Немченко // Современное состояние и методы защиты окружающей среды на нефтеперерабатывающих и сланцеперерабатывающих производствах : сб. науч. тр. / ЦНИИТЭнефтехим. – М. : Мир, 1984. – С. 51–56.
4. Минигазимов, И. Н. Пути решения экологических проблем на предприятиях транспорта нефти и нефтепродуктов / И. Н. Минигазимов, А. Ф. Файзуллин // Нефтепереработка и нефтехимия – 2005 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т нефтехимпереработки Респ. Башкортостан. – Уфа, 2005. – С. 350–351.
5. Исследование детергентов для вымывания легких фракций из нефтешлама / И. Р. Ягафаров [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия – 2006 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т нефтехимпереработки Респ. Башкортостан. – Уфа, 2006. – С. 245–246.
6. Технология реагентной очистки нефтешламов от асфальтосмолопарафиновых отложений / Н. Х. Файзуллин [и др.] // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа : сб. науч. тр. – Уфа, 2005. – С. 237–239.
7. Проблема образования, переработки и утилизации нефтешламов / В. А. Гронь [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 9. – С. 159–162.
8. Анализ методов переработки нефтешламов. Проблемы и решения / С. В. Афанасьев [и др.] // Инновации и «зелёные» технологии : сб. матер. и докл. 2-й Всерос. науч.-практ. конф., Тольятти, 19 апр. 2019 г. / Российская академия наук, Самарский научный центр. – Самара, 2019. – С. 17–22.
9. Ахметов, А. Ф. Методы утилизации нефтешламов различного происхождения / А. Ф. Ахметов, А. Р. Гайсина, И. А. Мустафин // Нефтегазовое дело. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 98–101.
10. Чалов, К. В. Пиролиз торфа и нефтесодержащих отходов в присутствии металлосодержащих катализаторов / К. В. Чалов, Ю. В. Луговой // Вестник ТвГУ. Сер. Химия. – 2011. – № 12. – С. 159–163.

References

1. Abdrakhmanova E. N., Aminova G. K., Mazitova A. K., Yagafarova G. G. *Ekologicheskie aspekty polucheniya izomaslyanoy kisloty* [Environmental aspects of isobutyric acid production]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2013, no. 3, pp. 18–21. (in Russian)
2. Aminova A. S., Gaybullayev S. A., Dzhurayev K. A. *Ispol'zovanie nefteshlamov – racional'nyj sposob ih utilizacii* [The use of oil sludge is a rational method of their disposal]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Health and Safety*, 2015, no. 2, pp. 124–126. (in Russian)
3. Bibikov G. G., Berdin Yu. S., Nemchenko A. G. *Pererabotka i obezvrezhivanie nefteshlamov NPZ i NHK* [Refinery and NHK oil sludge processing and neutralization]. *Sbornik nauchn. trudov "Sovremennoe sostoyanie i metody zashchity okruzhayushchej sredy na neftepererabatyvayushchih i slancepererabatyvayushchih proizvodstvah"* [Proc. of JSC CNIITENeftekhim "Current state and methods of environmental protection in oil refining and shale processing facilities"]. Moscow, Mir Publ., 1984, pp. 51–56. (in Russian)
4. Minigazimov I. N., Fayzullin A. F. *Puti resheniya ekologicheskikh problem na predpriyatiyah transporta nefiti i nefteproduktov* [Ways to solve environmental problems at oil and petroleum products transport enterprises]. *Materialy mezhd. nauchno-prakt. konf. "Neftepererabotka i neftekhimiya – 2005"* [Proc. of Int. sci. and pract. conf. "Oil Refining and Petrochemicals – 2005"]. *Institut neftehimpererabotki Respubliki Bashkortostan* [Institute of petrochemical refining of the Republic of Bashkortostan], Ufa, 2005, pp. 350–351. (in Russian)
5. Yagafarov I. R., Leontyeva S. V., Barakhnina V. B., Matrosova T. V. *Issledovanie detergentov dlya vymyvaniya legkih frakcij iz nefteshlama* [Study of detergents for leaching light fractions from oil sludge]. *Materialy mezhd.*

- nauchno-prakt. konf. "Neftepererabotka i neftekhimiya – 2006"* [Proc. of Int. sci. and pract. conf. "Oil Refining and Petrochemicals – 2006"]. *Institut neftehimpererabotki Respubliki Bashkortostan* [Institute of petrochemical refining of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, 2006, pp. 245–246. (in Russian)
6. Fayzullin N. Kh., Rogozin V. I., Khasanov I. Yu., Gareyev M. M. *Tekhnologiya reagentnoj ochistki nefteshlamov ot asfal'tosmoloparafinovykh otlozhenij* [Reagent treatment of oil sludge from asphalt-resin-paraffin deposits]. *Sbornik nauchnykh trudov "Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefti, nefteproduktov i gaza"* [Proc. of Transtek Ltd. "Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, petroleum products and gas transportation systems"]. Ufa, 2005, pp. 237–239. (in Russian)
 7. Gron V. A., Korostovenko V. V., Shakhrai S. G., Kaplichenko N. M., Galayko A. V. *Problema obrazovaniya, pererabotki i utilizatsii nefteshlamov* [Problem of oil sludge formation, processing and utilization]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes of modern natural history*, 2013, no. 9, pp. 159–162. (in Russian)
 8. Afanasyev S. V., Kravtsova M. V., Pais M. A., Nosarev N. S. *Analiz metodov pererabotki nefteshlamov. Problemy i resheniya* [Problem of oil sludge formation, processing and utilization]. *Sbornik mater. i dokl. 2-j Vseros. nauch.-prakt. konf. "Innovatsii i "Zelyonoe" tekhnologii", Tol'yatti, 19 apr. 2019 g.* [Proc. of 2nd All-Russian sci. and prakt. conf. "Innovations and "Green" Technologies", Tolyatti, April 19, 2019. *Rossiyskaya akademiya nauk, Samarskij nauchnyy centr* [Russian Academy of Sciences, Samara scientific center]. Samara, SNC RAS Publ., 2019, pp. 17–22. (in Russian)
 9. Akhmetov A. F., Gaysina A. R., Mustafin I. A. *Metody utilizatsii nefteshlamov razlichnogo proiskhozhdeniya* [Methods for utilization of oil sludge of different origin]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 98–101. (in Russian)
 10. Chalov K. V., Lugovoy Yu. V. *Piroliz torfa i neftesoderzhashchih othodov v prisutstvii metallosoderzhashchih katalizatorov* [Pyrolysis of peat and oily waste in the presence of metal-containing catalysts]. *Vestnik TvGU. Ser. Himiya = Vestnik TvSU. Chemistry series*, 2011, no. 12, pp. 159–163. (in Russian)

Информация об авторах

Дударчик Владимир Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudwladm@gmail.com

Крайко Валентина Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Ануфриева Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Information about the authors

Vladimir M. Dudarchik – 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: dudwladm@gmail.com

Valiantsina M. Kraiko – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, associate professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Alena V. Anufrieva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ЗРЕЛОЙ И ПОГРЕБЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

А. Э. Томсон, Т. Я. Царюк, Т. В. Соколова, В. С. Пехтерева,
Ю. Ю. Навоша, М. Г. Калантаров, А. С. Марзан, И. П. Фалюшина

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследован компонентный состав образцов зрелой и погребенной в торфяной залежи древесины. Показаны различия в компонентном составе образцов погребенной древесины, свидетельствующие о неоднородном характере участков залежи по ботаническому составу растений-торфообразователей, степени разложения, а также о разной глубине залегания извлеченных образцов. Образцы зрелой и погребенной древесины исследованы методом ИК-спектроскопии. Спектры исследуемых образцов погребенной древесины близки между собой как по набору полос поглощения, так и по их интенсивности, что свидетельствует о близком химическом составе исследованных образцов. Такой же факт наблюдается и в случае спектров образцов лиственных пород древесины (береза, дуб, ольха). Сравнительный анализ ИК-спектров погребенной и зрелой древесины показал различие в области поглощения карбонильных групп (полоса на 1732 см^{-1} , присутствующая в спектрах зрелой древесины хвойных пород (пеллеты)), не наблюдается в спектре погребенной, что может быть обусловлено взаимодействием указанных функциональных групп в погребенной древесине с ионами зольных элементов торфяной залежи. Установлено, что основные процессы термического разложения образцов протекают в достаточно узком по сравнению с торфом диапазоне температур – от 301 до $386\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом разлагается от 61 до 72% органической массы, максимум скорости термолиза находится в области $358\text{--}362\text{ }^{\circ}\text{C}$ как для зрелой, так и погребенной древесины, за исключением дуба, имеющего температурный максимум при $347\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: погребенная древесина; зрелая древесина; компонентный состав; целлюлоза; лигнин; ИК-спектрофотометрия; термический анализ.

Для цитирования. Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Пехтерева В. С., Навоша Ю. Ю., Калантаров М. Г., Марзан А. С., Фалюшина И. П. Сравнительный анализ компонентного состава зрелой и погребенной древесины // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 144–153.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMPONENT COMPOSITION OF MATURE AND BURIED WOOD

A. E. Thomson, T. Ya. Tsaryuk, T. V. Sokolova, V. S. Pekhtereva,
Yu. Yu. Navosha, M. G. Kalantarov, A. S. Marzan, I. P. Falyushina

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

Abstract. The component composition of samples of mature and buried wood in peat deposits was studied. Differences in the component composition of buried wood samples are shown, indicating the heterogeneous nature of the deposit areas in terms of the botanical composition of peat-forming plants, the degree of decomposition, as well as different depths of the recovered samples. Samples of mature and buried wood were studied by IR spectroscopy. The spectra of the studied samples of buried wood are close to each other both in the set of absorption bands and in their intensity, which indicates similar chemical composition of the studied samples. The same fact is observed in case of the spectra of deciduous wood samples (birch, oak, alder). A comparative analysis of the IR spectra of buried and mature wood showed a difference in the absorption region of carbonyl groups (the band at 1732 cm^{-1} , present in the spectra of mature coniferous wood (pellets)), is not observed in the spectrum of buried, which may be due to the interaction of these functional groups in buried wood with ions of ash elements of a peat deposit, it was established that the main processes of samples thermal decomposition occur in a rather narrow temperature range compared to peat – from 301 to $386\text{ }^{\circ}\text{C}$, while 61 to 72% of the organic mass decomposes, the maximum rate of thermolysis, is in the range of $358\text{--}362\text{ }^{\circ}\text{C}$ for both mature and buried wood, with the exception of oak, which has a temperature maximum at $347\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Keywords: buried wood; mature wood; component composition; cellulose; lignin; IR spectrophotometry; thermal analysis.

For citation. Tomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Pekhtereva V. S., Navosha Yu. Yu., Kalantarov M. G., Marzan A. S., Falyushina I. P. Comparative analysis of the component composition of mature and buried wood. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 144–153.

Введение. По химическому составу древесина представляет собой сложный комплекс органических молекул и биополимеров с небольшой примесью минеральных веществ (рис. 1) [1].

Все вещества древесины разделяют на структурные и неструктурные. Основную массу древесины составляют *структурные* компоненты – строительные вещества стенки клеток древесной ткани. Они не извлекаются растворителями. Такими веществами являются три основных компонента древесины – целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин – относятся к природным полимерам.

К *неструктурным* компонентам относятся различные растворимые и нерастворимые вещества. Часть из них (растворимые) – до 5 % – можно извлекать (экстрагировать) из древесины водой или органическими растворителями. Это экстрактивные вещества, которые не входят в состав клеточных стенок (но могут их пропитывать).

Известно, что химический состав древесины лиственных и хвойных пород варьирует в широких пределах под влиянием ряда факторов, среди которых наиболее важными являются видовая принадлежность, ботанико-географическая зона произрастания деревьев и погодные условия вегетационного периода [2].

Изменение древесных остатков в торфогенном слое и в глубине торфяной залежи происходит под влиянием взаимно связанных физических и химических факторов окружающей среды. Влияние физических факторов сводится к воздействию в поверхностных слоях тепла, света и влаги, что является подготовительной стадией к более глубокому химическому изменению вещества древесины под влиянием ферментов растений, главным образом микроорганизмов. Решающую роль играют вид и химический состав древесины [3].

В погребенной древесине торфа верхового и низинного типов содержание смолистых веществ, извлекаемых органическими растворителями, возрастает с увеличением степени разложения торфа, при одинаковой степени разложения торфов оно уменьшается с увеличением глубины залегания. Содержание смолистых веществ в образцах хвойной древесины, отобранных с одинаковой глубины, из низинной торфяной залежи выше, чем из верховой. На увеличение содержания смолистых веществ оказывают влияние экологические, климатические и микроклиматические условия.

Содержание водорастворимых веществ в древесине увеличивается с ростом степени разложения торфа. Наличие целлюлозы является показателем сохранности торфа и погребенной в нем древесины. Содержание в древесине целлюлозы уменьшается с повышением степени разложения торфа. В древесине, расположенной на различной глубине, в верховых залежах при степени разложения торфа, равной 25 %, содержание целлюлозы практически одинаковое. Анаэробному бактериальному разрушению клетчатки препятствуют кислая реакция среды верховых торфяников, ее антисептические свойства, малая зольность.

Содержание в древесине торфяных залежей негидролизующего остатка, принимаемого за лигнин, находится в зависимости от типа и степени разложения торфа, а также глубины залегания древесины в залежи [4]. С увеличением степени разложения торфа содержание лигнина в древесине растет. На изменение состава негидролизующего остатка существенное влияние оказывает возраст торфяной залежи, в которой расположена древесина.

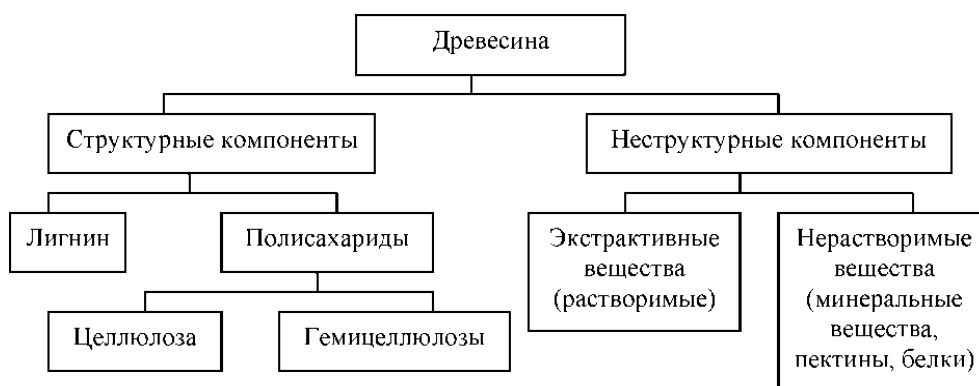


Рис. 1. Химический состав древесины

Fig. 1. Chemical composition of wood

Многочисленные исследования показали, что на изменение химического состава древесины влияют тип и степень разложения торфа в залежи. Кроме того, на химический состав древесины низинной залежи оказывает влияние и глубина залегания, или возраст. В древесине залежи верхового типа, обладающей антисептическими свойствами, эти изменения с возрастом незначительны.

В древесине хвойных пород низинных торфяных залежей происходят более глубокие химические изменения, чем в верховых. Эти изменения связаны с изменением ароматической части лигнина.

Сведения о составе древесины в пластах торфяных месторождений необходимы не только для расшифровки генезиса горючих ископаемых. Они представляют практический интерес и в связи с необходимостью освобождения площадей выработанных торфяных месторождений от пней. Кроме того, практически все вновь вырабатываемые торфяные месторождения являются верховыми и содержат большое количество малоразрушенной древесины, термическая переработка которой с получением активированных углей является актуальной [3].

Цель работы – провести сравнительные исследования химического (компонентного) состава образцов зрелой и погребенной древесины.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись образцы лиственной (дуб, ольха, береза) и хвойной древесины, представленной в виде пеллет производства Борисовского опытного лесхоза, а также образцы погребенной древесины (образец № 1 и № 2), отобранные из штабеля извлеченных из торфа древесных остатков, образовавшихся в результате подготовки участков месторождения «Туршовка-Чертово» ОАО «Туршовка» к последующей добыче торфа.

Исследование компонентного состава образцов погребенной древесины и древесных пеллет проведено по методу Инсторфа [5], определение золы – по ГОСТ Р 56881-2016 при температуре 600 °С, определение целлюлозы и экстрагируемых горячей водой веществ – по методикам, описанным в [1].

ИК-спектры образцов зрелой и погребенной древесины регистрировали на ИК-спектрофотометре с Фурье-преобразованием IPreStige-21 (Shimadzu) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Порошки образцов измельчали на вибрационной мельнице до порошкообразного состояния и затем прессовали в тонкую гибкую таблетку (толщина ~0,1–0,2 мм) между двумя полированными стальными пластинами. Подготовленный таким способом образец позволял обеспечить хороший контакт между образцом и призмой ZnSe приставки НПВО. При исследовании использовали приставку однократного отражения MIRacle.

Термогравиметрический анализ проводили на синхронном термоанализаторе STA 2500 фирмы NETZSCH, работающем под управлением программного пакета NETZSCH Proteus Thermal Analysis. Условия проведения исследований: термопара – тип S; тигель – Pt; эталон – Al₂O₃; масса образца – 8–10 мг; скорость нагрева – 10 К/мин, диапазон температур – 30–1000 °С; газ-носитель, защитный газ – азот; расход: газа-носителя – 20 мл/мин, защитного газа – 30 мл/мин.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения компонентного состава отобранных образцов погребенной древесины и древесных пеллет приведены в табл. 1.

Таблица 1. Компонентный состав образцов погребенной древесины в торфяных залежах и древесных пеллет

Table 1. Component composition of samples of buried wood in peat deposits and wood pellets

Образец	Битум, %	Водорастворимые и легкогидролизуемые вещества, %	Гуминовые кислоты, %	Фульво-кислоты, %	Целлюлоза, %	Лигнин, %
Пеллеты	1,4	24,8	0,0	0,0	47,4	26,4
Погребенная древесина № 1	3,2	18,2	2,4	12,5	41,0	22,7
Погребенная древесина № 2	1,0	20,1	1,2	10,4	48,2	19,1

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что содержание лигнина, водорастворимых и легкогидролизуемых веществ в пеллетах (отходы хвойных пород) несколько выше по сравнению с содержанием указанных компонентов в образцах погребенной древесины. Гуминовые вещества также отсутствуют. В образцах погребенной древесины содержание гуминовых веществ составляет 11,6–14,9 %, что свидетельствует о протекании процесса гумификации.

Известно, что в погребенной древесине [4] содержание лигнина растет с увеличением степени разложения торфа в торфяной залежи. Содержание лигнина в образце № 1 (табл. 1) на 18,8 % больше по сравнению с содержанием лигнина в образце № 2. Это указывает на то, что образец № 1, возможно, извлечен из залежи, содержащий торф более высокой степени разложения. Содержание битумов (веществ, извлекаемых органическим растворителем) в образце № 1 в 3 раза больше, чем в образце № 2, и, возможно, это свидетельствует о том, что образец № 1 представляет собой погребенную древесину хвойной породы, когда-то произраставшей на данном участке торфяной залежи. Древесина хвойных пород содержит больше смолистых веществ, чем лиственная. В образце № 2 содержание гуминовых

веществ несколько ниже по сравнению с образцом № 1 (11,6 и 14,9 % соответственно), что соответствует менее интенсивному процессу гумификации в образце № 2. Отличия в количественном содержании компонентов в исследуемых образцах, возможно, связаны также и с разной глубиной их залегания в торфяном слое.

Результаты изучения физико-химических свойств и химического состава зрелой и погребенной древесины представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства и компонентный состав образцов зрелой и погребенной древесины

Table 2. Physicochemical properties and component composition of samples of mature and buried wood

Материал	Влажность, %	Зольность, %	Целлюлоза, %	Экстрактивные вещества, %
Древесина дуба	9,98	0,4	45,8	9,9
Древесина ольхи	6,2	0,85	47,9	7,7
Древесина березы	10,3	1,1	53,0	4,4
Древесина хвойных пород (пеллеты)	6,8	0,3	65,2	3,7
Погребенная древесина № 1	3,1	1,7	48,0	9,4
Погребенная древесина № 2	6,5	0,7	59,9	3,2

В древесине хвойных пород содержание целлюлозы больше на 23,0 %, чем в древесине березы, а по сравнению с древесиной дуба и ольхи – на 42,4 и 36,1 % соответственно. Так как наличие целлюлозы является показателем сохранности погребенной в торфе древесины и ее содержание уменьшается с повышением степени разложения торфа в залежи, можно утверждать, что образец № 2, содержащий большее количество целлюлозы чем образец № 1, извлечен из залежи торфа меньшей степени разложения (гумификации).

Содержание экстрактивных веществ, извлекаемых горячей водой, в древесине березы, древесине хвойных пород, образце № 2 погребенной древесины примерно одинаковое – 4,4–3,7 %, в древесине дуба и ольхи, а также в погребенной древесине № 1 более высокое – 7,7–9,9 %.

Методом ИК-спектроскопии выполнено исследование образцов погребенной и зрелой древесины. На рис. 1 представлены ИК-спектры двух образцов погребенной древесины, а на рис. 2 – ИК-спектры древесины хвойных пород (пеллеты), древесины дуба, ольхи и березы.

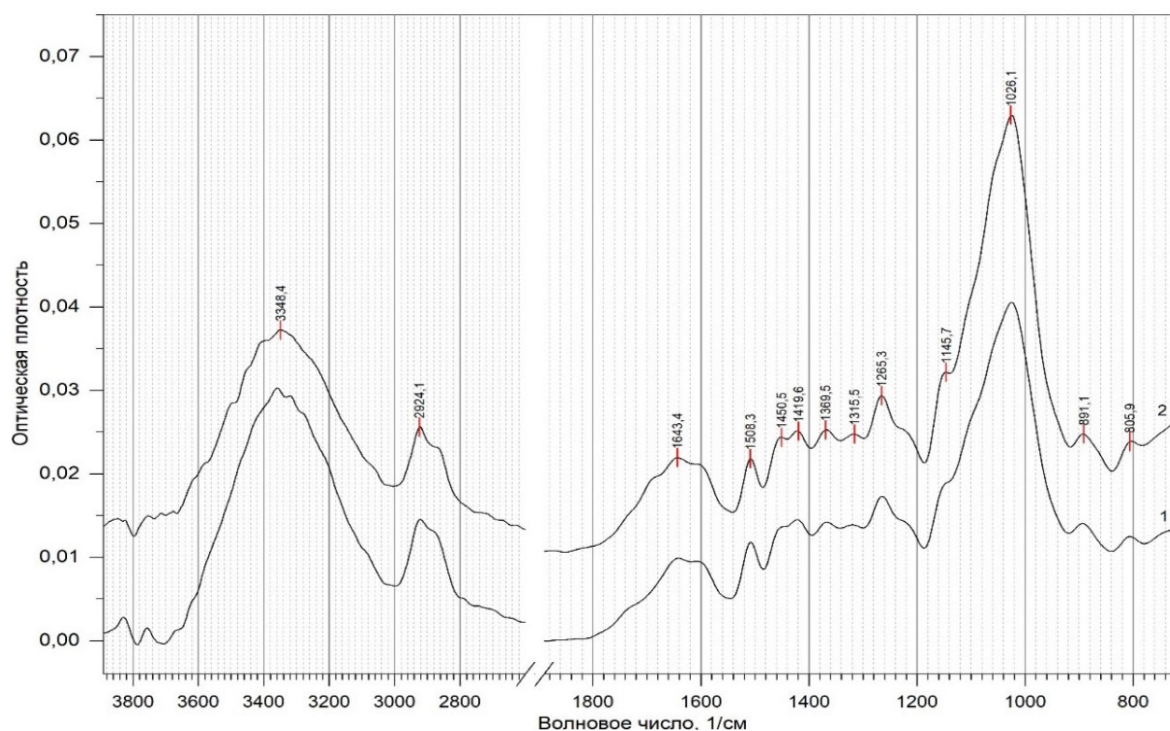


Рис. 1. ИК-спектры образцов № 1 (1) и № 2 (2) погребенной древесины

Fig. 1. IR spectra of samples № 1 (1) and № 2 (2) of buried wood

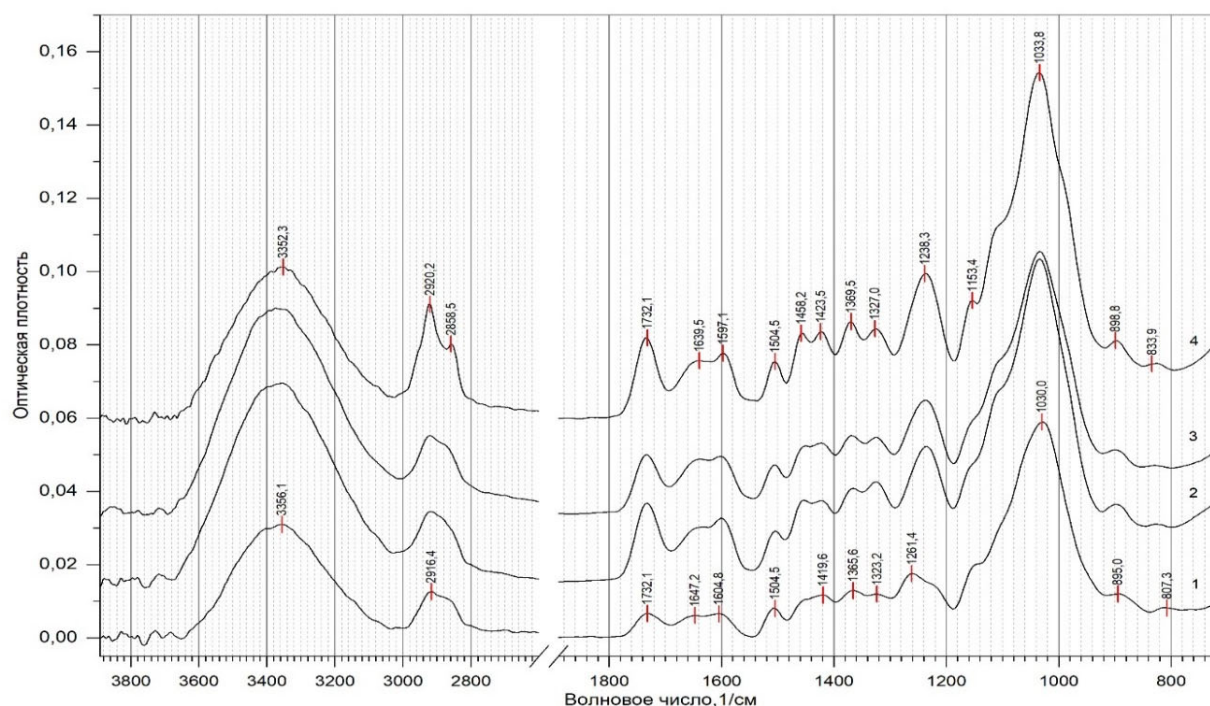


Рис. 2. ИК-спектры древесины хвойных пород (пеллеты) (1), дуба (2), ольхи (3) и березы (4)

Fig. 2. IR spectra of coniferous wood (pellets) (1), oak (2), alder (3) and birch (4)

На ИК-спектрах погребенной и зрелой древесины можно выделить несколько областей: область $3600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ характеризует валентные колебания различных типов гидроксильных групп, связанных водородными связями; область $3000\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ – область симметричных и асимметричных валентных колебаний C–H групп метильных, метиленовых, метинных группировок компонентов древесного композита; область $1800\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ (область «отпечатков пальцев») – область валентных колебаний групп с кратными связями (C=O, C=C, CAr–CAr), валентных колебаний C–C и C–O связей, а также деформационных колебаний C–H связей и OH-групп компонентов древесины: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз; область $1000\text{--}700\text{ см}^{-1}$ – область внеплоскостных деформационных колебаний C–H-связей ароматического кольца лигнина, колебаний глюкопиранозного кольца целлюлозы и гемицеллюлоз, внеплоскостных деформационных колебаний OH-групп целлюлозы и гемицеллюлоз.

Как показывает анализ полученного материала, спектры образцов погребенной древесины близки между собой как по набору полос поглощения, так и по их интенсивности, что свидетельствует о близком химическом составе исследованных образцов. Наблюдаемые различия в интенсивности отдельных полос и их положении могут быть обусловлены разным количественным компонентным составом образцов (табл. 2). Такая же закономерность наблюдается и в случае спектров образцов лиственных пород древесины – березы, дуба и ольхи (см. рис. 2). ИК-спектр образца хвойных пород древесины (пеллеты) отличается от спектров образцов лиственных пород древесины:

1) полоса поглощения валентных колебаний связей C=O в несопряженных кетонах, карбонильных соединениях и в сложноэфирных группах на 1732 см^{-1} менее интенсивна;

2) широкая полоса скелетных колебаний связей C–C S-колец лигнинов и валентных колебаний C–O в фенолах синрингильных структурных единиц на 1238 см^{-1} отсутствует на спектрах древесины хвойных пород: вместо нее появляется полоса на 1261 см^{-1} (деформационные колебания связей C–H HGS колец лигнинов и колебания связей C=O в сопряженных сложноэфирных группах) с плечом на 1220 см^{-1} (скелетные колебания связей C–C G-колец лигнинов и валентные колебания C–O в фенолах гваяцильных структурных единиц) [6, 7];

3) на ИК-спектрах появляется полоса на 807 см^{-1} (деформационные внеплоскостные колебания связей C–H в позициях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца) [6, 7].

На рис. 3 представлены ИК-спектры погребенной древесины № 1 и древесины хвойных пород (пеллеты). Сравнительный анализ ИК-спектров погребенной и зрелой древесины показал, что они также близки между собой по набору полос поглощения и по их относительной интенсивности.

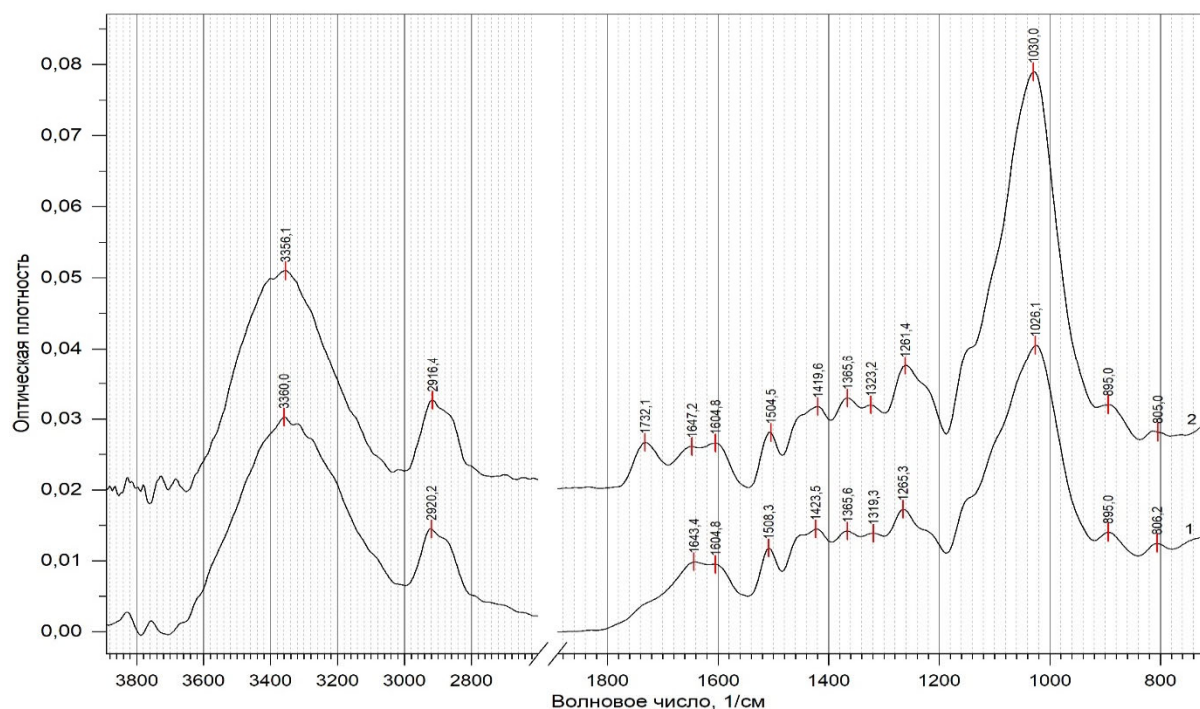


Рис. 3. ИК-спектры: 1 – погребенной древесины (образец № 1); 2 – древесины хвойных пород (пеллеты)

Fig. 3. IR spectra: 1 – buried wood (sample № 1); 2 – coniferous wood (pellets)

Различие отмечается в области поглощения карбонильных групп – полоса на 1732 см^{-1} , присутствующая в спектре древесины хвойных пород, не наблюдается в спектре погребенной древесины, что может быть обусловлено взаимодействием указанных функциональных групп в погребенной древесине с ионами зольных элементов торфяной залежи. Наличие на обоих ИК-спектрах полосы на 807 см^{-1} (деформационные внеплоскостные колебания связей C–H в позициях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца) подтверждает предположение, что погребенная древесина относится к хвойной породе [6, 7].

Продуктами термического разложения древесины в инертной атмосфере являются неконденсируемые газы, тяжелые летучие вещества (в том числе древесная смола) и древесный уголь. В целом термическая деструкция древесины как в инертной, так и в окислительной среде может быть представлена суммой реакций термического разложения отдельных компонентов: гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина. При этом известно, что температурные интервалы термической деструкции этих компонентов частично перекрываются [8]. Термическое разложение гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина происходит в интервалах $225\text{--}325\text{ °C}$, $305\text{--}375\text{ °C}$ и $250\text{--}500\text{ °C}$ соответственно [9].

Разложение целлюлозы происходит через дегидратацию, гидролиз, окисление, декарбоксилирование. Гемицеллюлозы менее термически стабильны по сравнению с целлюлозой и лигнином, что обусловлено присутствием ацетильных групп [8].

Экстрактивные вещества, несмотря на небольшую долю ($\sim 2\text{--}5\%$) в составе древесины, значительно влияют как на механическую прочность и цвет, так и на термическую стабильность. Установлено, что экстрактивные вещества, извлекаемые этанолом, по-разному влияют на термическую стабильность древесины хвойных и лиственных пород. Экстрактивные вещества древесины хвойных пород разрушаются при более низкой температуре по сравнению с другими компонентами и не оказывают влияния на их термическую стабильность, а экстрактивные вещества лиственных пород способствуют термической деструкции древесины [10]. Другие исследователи [11] обнаружили, что удаление экстрактивных веществ вызывает снижение доли углерода в древесном веществе и уменьшение образования угля, возрастание скорости потери массы, а также смещение температурных интервалов термодеструкции компонентов древесины в область более высоких значений.

Результаты термоллиза объектов исследования в инертной атмосфере представлены на рис. 4, 5 и в табл. 3, 4.

В интервале температур до 150 °C происходит некоторое снижение массы образцов, связанное с удалением физически адсорбированной влаги и легколетучих компонентов, при этом наибольшее их содержание наблюдается у погребенной древесины (см. табл. 3).

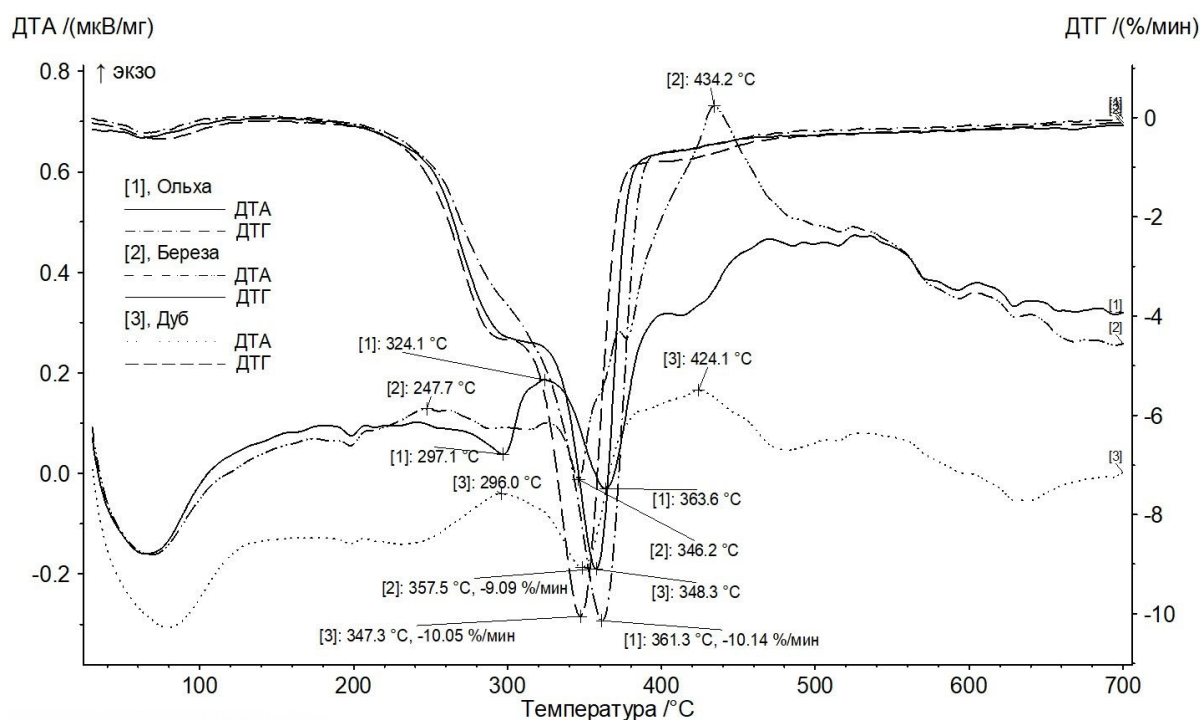


Рис. 4. Термограммы образцов древесины лиственных пород

Fig. 4. Thermograms of hardwood samples

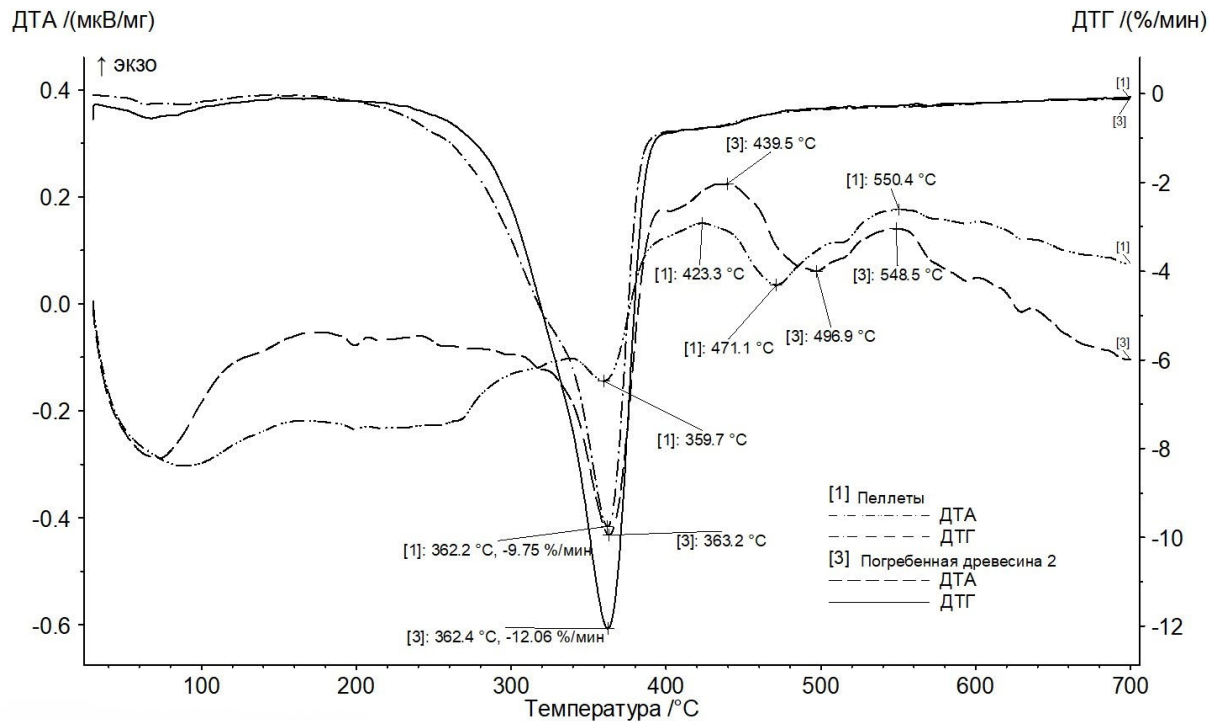


Рис. 5. Термограммы образцов пеллет и погребенной древесины

Fig. 5 Thermograms of pellet and buried wood samples

Таблица 3. Потеря массы объектов исследования в различных температурных диапазонах**Table 3. Mass loss of study objects in various temperature ranges**

Наименование	Температура и скорость максимума термолитиза, °C/% в мин	Потеря массы, %			Остаточная масса, %
		30–150 °C	150–600 °C	600–950 °C	
Зрелая древесина					
Древесина дуба	$\frac{347,3}{10,05}$	2,61	76,65	6,56	14,44
Древесина ольхи	$\frac{361,3}{10,14}$	1,14	75,69	1,38	21,77
Древесина березы	$\frac{357,5}{9,09}$	2,30	71,66	7,28	18,73
Древесина хвойных пород (пеллеты)	$\frac{362,2}{9,75}$	1,57	72,76	4,09	21,56
Погребенная древесина					
Образец № 1	$\frac{357,9}{9,64}$	2,35	72,86	5,12	19,61
Образец № 2	$\frac{362,4}{12,06}$	3,79	78,88	4,47	12,77

Расчет потери массы образцов в температурных диапазонах, соответствующих процессам коксования (до 600 °C) и активации (600–900 °C), позволил установить (см. табл. 3), что образцы теряют на первом этапе от 71,5 до 79 % массы, а на втором – от 1,3 до 7,3, а остаточная масса после нагрева до 1000 °C составляет от 12,8 до 21,8 %.

Установлено, что максимум скорости термолитиза находится в области 358–362 °C как для зрелой, так и для погребенной древесины. Исключение составляет древесина дуба, максимум термического разложения которой сдвинут в сторону более низких температур, что может быть связано, как указано в [10], с высоким содержанием экстрактивных веществ. Наибольшая скорость разложения органического вещества зафиксирована для образца погребенной древесины № 2 (12,06 % в мин), наименьшая – для березы (9,09 % в мин).

Наиболее полно процесс термического разложения происходит у погребенной древесины № 2 и дуба, остаточная масса которых составляет 12,8–14,5 %.

С помощью программного обеспечения NETZSCH Proteus Ternal Analysis рассчитана потеря массы по Маршу композитов в интервале температур 185–845 °C (табл. 4).

Таблица 4. Потеря массы образцов древесины**Table 4. Loss of mass of wood samples**

Наименование	Температура, °С				Потеря массы, %
	Начало	Середина	Перегиб	Конец	
Зрелая древесина					
Древесина дуба	301,7	337,9	347,3	373,1	67,57
Древесина ольхи	310,8	348,7	360,9	385,6	69,72
Древесина березы	304,7	340,9	358,1	379,0	61,29
Древесина хвойных пород (пеллеты)	313,6	350,3	362,2	386,5	64,08
Погребенная древесина					
Образец № 1	313,0	349,7	359,5	384,2	60,64
Образец № 2	321,5	354,2	361,3	385,9	72,03

Установлено, что основные процессы термического разложения образцов протекают в достаточно узком по сравнению с торфом диапазоне температур: от 301 °C до 386 °C, при этом разлагается от 61 до 72 % органической массы.

У всех исследованных образцов зафиксировано до шести тепловых эффектов, свидетельствующих о сложном характере трансформации вещества в процессе термической деструкции.

Заключение. На торфяном месторождении «Туршовка-Чертово» отобраны образцы погребенной древесины. Проведен анализ компонентного состава древесных пеллет и погребенной древесины по методу Инсторфа. Показано, что содержание химических компонентов (битумов, водорастворимых и легкогидролизуемых веществ, гуминовых веществ, лигнина) в образцах погребенной древесины различно. Это свидетельствует о том, что они извлечены из участков торфяной залежи, различающихся степенью разложения, ботаническим составом растений-торфообразователей, а также глубиной залегания древесины в залежи.

Определен компонентный состав (целлюлоза, экстрактивные вещества, зольные элементы) древесины лиственных пород (дуб, ольха, береза), хвойных пород (древесные пеллеты) и погребенной древесины. Показано, что содержание целлюлозы в древесине березы выше, чем в древесине дуба и ольхи, а экстрактивных веществ больше в древесине дуба. В погребенной древесине содержание целлюлозы в образце № 2 больше, чем в образце № 1. Высокое содержание целлюлозы в древесных пеллетах – 65,2 %. Высокое содержание экстрактивных веществ обнаружено в образце № 1 погребенной древесины и древесине дуба.

Образцы погребенной и зрелой древесины исследованы методом ИК-спектроскопии. Спектры исследуемых образцов погребенной древесины близки между собой как по набору полос поглощения, так и по их интенсивности, что свидетельствует о близком компонентном составе исследованных образцов. Такой же факт наблюдается и в случае спектров образцов зрелой древесины лиственных пород.

ИК-спектр образца древесины хвойных пород отличается от ИК-спектров древесины лиственных пород менее интенсивной полосой карбонильных групп на 1732 см^{-1} ; вместо широкой полосы скелетных колебаний связей С—С S-колец лигнинов и валентных колебаний С—О в фенолах сиригильных структурных единиц на 1238 см^{-1} наблюдается полоса на 1261 см^{-1} (деформационные колебания связей С—Н HGS колец лигнинов и колебания связей С=О в сопряженных сложнотерфенольных группах) с плечом на $\sim 1220\text{ см}^{-1}$ (скелетные колебания связей С—С G-колец лигнинов и валентные колебания С—О в фенолах гваяцильных структурных единиц); на ИК-спектрах появляется полоса на 807 см^{-1} (деформационные внеплоскостные колебания связей С—Н в позициях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца).

Сравнительный анализ ИК-спектров погребенной и зрелой древесины показал различие в области поглощения карбонильных групп (полоса на 1732 см^{-1} , присутствующая в спектре древесины пеллет, не наблюдается в спектре погребенной), что может быть обусловлено взаимодействием указанных функциональных групп в погребенной древесине с ионами зольных элементов торфяной залежи. В погребенной древесине не наблюдается и полоса на 1238 см^{-1} . (Полосы в области $1248\text{--}1232\text{ см}^{-1}$ характеризуют колебания ароматического кольца сиригильного типа и колебания С—О-связи в лигнине и ксилане.)

Установлено, что основные процессы термического разложения образцов протекают в достаточно узком по сравнению с торфом диапазоне температур – от $301\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $386\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом разлагается от 61 до 72 % органической массы. У всех исследованных образцов зафиксировано до шести тепловых эффектов, свидетельствующих о сложном характере трансформации вещества в процессе термической деструкции. Наибольшая скорость разложения органического вещества зафиксирована для образца погребенной древесины № 2 (12,06 % в мин), наименьшая скорость – для березы (9,09 % в мин). Установлено, что максимум скорости термолитиза находится в области $358\text{--}362\text{ }^{\circ}\text{C}$ как для зрелой, так и для погребенной древесины, за исключением дуба, имеющего температурный максимум при $347\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Список использованных источников

1. Нуштаева А. В. Химия древесины : учеб. пособие / А. В. Нуштаева. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 100 с.
2. Fengel D. Chemische Zusammen von Nadel- und Laubholzern / D. Fengel, D. Grosser // HOLZ als Roh- und Werkstoff. – 1975. – Vol. 33, № 1. – P. 32–34.
3. Раковский, В. Е. Химия и генезис торфа / В. Е. Раковский, Л. В. Пигулевская. – М. : Недра, 1978. – 230 с.
4. Мурашкевич, Т. В. Изменение химических свойств лигнина, древесины торфяных залежей / Т. В. Мурашкевич // Сб. науч. тр. ИФох АН БССР. – Минск : АН БССР, 1961. – № 9. – С. 119.
5. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
6. Тюткова, Е. А. ИК-спектроскопия древесины индивидуальных годовичных слоев / Е. А. Тюткова, С. Р. Лоскутов, Н. П. Шестаков // Хвойные бореальные зоны. – 2017. – Т. XXXV, № 3–4. – С. 61–67.
7. Разработка метода идентификации породы древесины в археологических материалах методом ИК-спектроскопии / В. М. Пожидаева [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2019. – Т. 74, № 12. – С. 911–921.
8. Vichnevsky, S. Characterization of wood and non-wood mechanical pulps by differential thermal analysis / S. Vichnevsky, B. Fuhr, J. Melnichuk // J. Pulp & Paper Sci. – 2003. – Vol. 29, № 1. – P. 17–20.
9. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D. K. Shen [et al.] // Fuel. – 2009. – Vol. 88. – P. 1024–1030.
10. Sebio-Puna, I. T. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species / I. T. Sebio-Puna, S. Naya, J. Lopez-Beceiro // J. Therm. Anal. Calorim. – 2012. – Vol. 109, № 3. – P. 1163–1167.
11. Varhegyi, G. Effect of sample origin, extraction, and hot water washing on the devolatilization kinetics of chestnut wood / G. Varhegyi, M. G. Gronli, C. Di Blasi // Ind. Eng. Chem. Res. – 2004. – Vol. 43. – P. 2356–2367.

References

1. Nushtaeva A. V. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood]. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2013, 100 p. (in Russian)
2. Fengel D., Grosser D. Chemische Zusammen von Nadel- und Laubholzern. *HOLZ als Roh- und Werkstoff*, 1975. vol. 33, no. 1, pp. 32–34.

3. Rakovskiy V. E., Pigulevskaya L. V. *Khimiya i genezis torfa* [Chemistry and genesis of peat]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 230 p. (in Russian)
4. Murashkevich T. V. *Izmenenie khimicheskikh svoystv lignina, drevesiny torfyanykh zalezhey* [Changes in the chemical properties of lignin and peat wood]. *Sbornik Nauchnykh trudov IFOKh AN BSSR* [Proc. of the Institute of Organophysical Chemistry of the NAS of the BSSR]. Minsk, AN BSSR, 1961, no. 9, pp. 119. (in Russian)
5. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
6. Tyutkova E. A., Loskutov S. R., Shestakov N. P. *IK-spektroskopiya drevesiny individualnykh godichnykh sloev* [IR spectroscopy of wood of individual growth layers]. *Khvoynye borealnye zony = Coniferous boreal areas*, 2017, vol. XXXV, no. 3–4, pp. 61–67. (in Russian)
7. Pozhidaeva V. M., Retivov V. M., Panarina E. I., Sergeeva Ya. E., Zhdanovich O. A., Yatsishina E. B. *Razrabotka metoda identifikatsii porody drevesiny v arkheologicheskikh materialakh metodom IK-spektroskopii* [Development of a method for identifying wood species in archaeological materials using IR spectroscopy]. *Zhurnal analiticheskoy khimii = Journal of Analytical Chemistry*, 2019, vol. 74, no. 12, pp. 911–921. (in Russian)
8. Vichnevsky S., Fuhr B., Melnichuk J. Characterization of wood and non-wood mechanical pulps by differential thermal analysis. *J. Pulp & Paper Sci.*, 2003, vol. 29, no. 1, pp. 17–20.
9. Shen D. K., Gu S., Luo K. H., Bridgwater A. V., Fang M. X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 2009, vol. 88, pp. 1024–1030.
10. Sebio-Punal T., Naya S., Lopez-Beceiro J., Tarrio-Saaverda J., Artiaga R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, vol. 109, no. 3, pp. 1163–1167.
11. Varhegyi G., Gronli M. G., Di Blasi C. Effect of sample origin, extraction, and hot water washing on the devolatilization kinetics of chestnut wood. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, vol. 43, pp. 2356–2367.

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@jandex.ru

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Фалюшина Ирина Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

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. Pekhtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@jandex.ru

Yulian Yu. Navosha – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navoscha@tut.by

Mikhail G. Kalantarov – Ph. D. (Biology), Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

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

Irina P. Falyushyna – 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

ВЛИЯНИЕ ФОРМ И КОНЦЕНТРАЦИЙ НА ВЫМЫВАЕМОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Н. Е. Сосновская, О. Г. Красноберская, В. А. Ракович

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучено влияние форм и концентраций микроэлементов в составе гранулированных органоминеральных удобрений на их переход из гранул в водный экстракт и его биологическую (ростстимулирующую) активность для обоснования составов и технологии получения новых видов органоминеральных удобрений. Показаны существенное различие в величине перехода микроэлементов из солевой и хелатной формы гранул комплексных гранулированных удобрений (КГУ) в водорастворимую, доступную для растений форму и влияние на нее температурной обработки гранул.

Обнаружено, что при использовании меди и цинка в виде неорганической соли максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечена для их низких концентраций при температуре сушки гранул КГУ 90–125 °С, для высоких концентраций – при 110 °С. При использовании меди в виде хелата максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечена для низкой и высокой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 25 °С, для средних концентраций – при 90–110 °С. При использовании хелата цинка максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечена для низкой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 125 °С, для высокой концентрации – при 110 °С.

Ключевые слова: гранулированные органоминеральные удобрения; микроэлементы; вымываемость; биологическая (ростстимулирующая) активность.

Для цитирования. Сосновская Н. Е., Красноберская О. Г., Ракович В. А. Влияние форм и концентраций на вымываемость микроэлементов и биологическую активность гранулированных органоминеральных удобрений // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 154–163.

THE EFFECT OF FORMS AND CONCENTRATIONS ON THE WATER RESISTANCE OF THE MICROELEMENTS AND BIOLOGIC ACTIVITY OF GRANULATED ORGANOMINERAL FERTILIZERS

N. E. Sosnovskaya, O. G. Krasnoberskaya, V. A. Rakovich

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

Abstract. The influence of forms and concentrations of trace elements in the composition of granulated organomineral fertilizers on their transition from granules to aqueous extract and its biological (growth-stimulating) activity was studied to substantiate the compositions and technology for new types of organomineral fertilizers obtaining. A significant difference in the value of the transition of microelements for the salt and chelated forms from granular organomineral fertilizers to the water-soluble form available for plants and the effect of temperature treatment of granules are shown.

It was found that when copper and zinc were used in the form of inorganic salt, the maximum biological (growth-stimulating) activity was observed for low concentrations at the drying temperature of granular organomineral fertilizers at 90–125 °C, for high concentrations – at 110 °C. When using copper in chelate form, the maximum biological (growth-stimulating) activity was observed for low and high concentrations at the drying temperature of granular organomineral fertilizers at 25 °C, for medium concentrations – at 90–110 °C. When using zinc chelate, the maximum biological (growth-stimulating) activity was observed for low concentration at the drying temperature of granular organomineral fertilizers at 125 °C, for high concentration – at 110 °C.

Keywords: granular organomineral fertilizers; microelements; water resistance; biologic (growth-stimulating) activity.

For citation. Sosnovskaya N. E., Krasnoberskaya O. G., Rakovich V. A. The effect of forms and concentrations on the water resistance of the microelements and biologic activity of granulated organomineral fertilizers. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 154–163.

Введение. Все живые организмы нуждаются в микроэлементах для выживания, правильного роста и развития. Микроэлементы необходимы для правильного протекания важнейших физиологических и биохимических процессов развития растений, входят в состав ферментов и витаминов, активируют процессы синтеза углеводов, белкового и жирового обмена веществ, влияют на проницаемость клеточных мембран и повышение эффективности азота, фосфора и калия [1]. В условиях дефицита микроэлементов нарушаются процессы обмена веществ в растениях, задерживается их развитие, снижается устойчивость к неблагоприятным условиям внешней среды и болезням. Микроэлементы влияют не только на растения, но и на некоторые заболевания человека и животных, связанные с недостатком их в продуктах питания и кормах.

Все более широкое применение интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур усиливает важность сбалансированного питания растений макро- и микроэлементами.

Корневое питание удовлетворяет до 90 % потребности в основных элементах, но практически не обеспечивает растение микроэлементами. Причинами этого являются антагонизм элементов, низкое содержание микроэлементов в почве и удобрениях, а также неблагоприятная кислотность почвы. Многие элементы питания доступны для растений в диапазоне значений pH от 5,5 до 7,0. Возрастающая роль микроэлементов в современном сельском хозяйстве Беларуси объясняется также снижением их подвижных форм в почве в связи с отрицательным балансом, обусловленным снижением почвенной кислотности, постоянным выносом урожаями и невнесением микроудобрений в почву.

Содержание ряда микроэлементов в почвах Беларуси не соответствует потребности растений для их нормального роста и развития. Отмечено увеличение площади пашни с низким содержанием меди с 42,2 до 50,9 %, цинка – с 59,7 до 68,4 %. Доля пахотных почв 1-й и 2-й групп обеспеченности, где необходимо применение микроудобрений, высокая и по бору составляет 68,5 %, по меди – 92,3, по цинку – 93,0 % [1].

Критериями потребности растений в микроэлементах являются их содержание в растениях и уровень их содержания в почве. При этом имеет значение не общее (валовое) количество микроэлементов в почве, а наличие подвижных форм, которые в определенной степени определяют доступность для растений. Чаще всего содержание микроэлементов в подвижной форме для меди, молибдена, кобальта и цинка составляет 10–15 % от валового содержания в почве, для бора – 2–4 % [1].

Степень подвижности микроэлементов в почве зависит от реакции среды, состава материнской породы, растительности, микробиологической активности, карбонатности, окислительно-восстановительных свойств, гранулометрического и минералогического состава, содержания гумуса, полуторных окислов, применения комплекса агротехнических мероприятий, особенно водной и химической мелиорации почвы, применения органических и минеральных удобрений.

В число важнейших микроэлементов входят медь и цинк.

Медь участвует в процессах фотосинтеза, углеводном и белковом обмене, способствует лучшему использованию растениями азота, фосфора и калия, повышает устойчивость растений к грибковым и бактериальным заболеваниям [2]. Медь также входит в окислительные ферменты, например, в полифенолоксидазу, активирует синтез витаминов группы В [3].

Недостаток меди снижает синтез белков, нарушает процессы превращения азота, что приводит к резкому снижению урожая и качества зерна. Характерными симптомами заболевания при недостатке меди у злаковых культур являются бледно-зеленая окраска, скручивание листьев, пустозерность и щуплость. На картофеле при дефиците меди листья скручиваются и засыхают, а на томате лист начинает белеть с нижней стороны. У бобовых и крестоцветных культур наблюдается суховершинность. При устранении дефицита меди увеличивается содержание белка в зерне, крахмалов в клубнях, сахара в корнеплодах, жиров в масличных культурах. Улучшаются показатели засухо- и морозоустойчивости, а также устойчивости к полеганию. При скармливании растительных кормов, содержащих малое количество меди, у животных появляются малокровие, рахит, наблюдается выпадение шерсти [4].

Дефицит меди часто совпадает с недостатком цинка и магния, а применение высоких доз азотных удобрений усиливает этот дефицит. Особо требовательны к меди зерновые культуры, рапс, сахарная свекла, лен, кукуруза [2].

Содержание меди в растениях достигает 2–12 мг/кг сухого вещества, вынос урожаями – 10–170 г/га. В почве медь аккумулируется в гумусовом слое и находится в виде органоминеральных комплексов, а частично – в обменно-поглощенном состоянии. Валовое ее содержание в минеральных почвах составляет 0,15–3 мг/100 г, в том числе в дерново-подзолистых почвах – 0,005–0,5 мг/100 г [3]. Безусловно необходимо вносить медные микроудобрения на большинстве торфянистых почв.

По данным агрохимических обследований почв пахотных земель средневзвешенное содержание меди в среднем по республике составляет 1,84 мг/кг, что соответствует оптимальному содержанию, однако доля площади почв, где необходимо применение медьсодержащих удобрений, составляет 86,2–97,8 % [2].

Цинк является составной частью ферментов, например, карбоангидразы, участвует в окислительно-восстановительных процессах, синтезе хлорофилла, углеводном обмене и синтезе белковых веществ в растениях, стимулирует образование ауксинов [2], а также участвует в процессе дыхания и фотосинтеза, повышает водоудерживающую способность клеток.

Недостаток цинка вызывает существенные нарушения белкового и жирового обмена веществ, что приводит к задержке роста растений и уменьшению количества хлорофилла в листьях. Хлороз, вызываемый недостатком цинка, обычно проявляется в виде мелких желтых пятен. У плодовых деревьев появляются белые пятна на листьях, розеточность и мелколистность, укороченность междоузлий, позднее – отмирание ветвей. Плоды либо не образуются, либо имеют уродливую форму [4]. При устранении дефицита отмечается снижение поражения растений грибковыми заболеваниями, повышается сахаристость плодов. Из других культур наиболее чувствительны к недостатку цинка кукуруза и лен.

Потребность растений в цинке усиливается с повышением интенсивности освещения.

Содержание цинка в растениях достигает 15–22 мг/кг сухого вещества, вынос урожаями – 0,075–2,25 кг/га. В почве валовое содержание цинка составляет 2,5–6,5 мг/100 г, в том числе в дерново-подзолистых почвах – 0,012–2 мг/кг [3].

Содержание цинка в пахотных почвах по республике в последнее время снизилось с 3,13 до 2,85 мг/кг, а доля площади пахотных почв, где необходимо внесение цинкостойких удобрений, составляет 89,4–96,0 % [2].

Дефицит цинка чаще наблюдается на переизвесткованных почвах, а при систематическом применении навоза снижается, так как содержание цинка в нем достигает 96 мг/кг [3].

Необходимо иметь в виду, что медь и цинк относятся к группе тяжелых металлов, поэтому повышение их содержания в почвах не должно превышать соответствующих пороговых значений загрязнения. В связи с этим дозировки микроудобрений и равномерность их внесения по площади поля имеют первостепенное значение, а оптимизация содержания микроэлементов в растениях является актуальной агрономической задачей [5–7].

В настоящее время производство микроудобрений развивается в двух направлениях, таких как производство односторонних микроудобрений в виде индивидуальных солей, хелатов, фриттов и производство комплексных и односторонних макроудобрений, обогащенных микроэлементами.

Односторонние микроудобрения применяют под культуры с сильной недостаточностью какого-либо микроэлемента. Недостатком применения односторонних микроудобрений является трудность внесения в малых дозах, особенно в почву, когда сложно добиться равномерного распределения по поверхности. Односторонние микроудобрения используются в виде хелатов и фриттов, что особенно важно при внесении бора, так как этим исключается воздействие локально высоких концентраций бора на чувствительные культуры.

В связи с вышеизложенным более рациональным является использование основных удобрений, обогащенных микроэлементами. Обогащенные макроудобрения сокращают затраты на внесение, имеют меньшую опасность токсического действия при внесении избыточных доз удобрений, уменьшают загрязнение окружающей среды.

Традиционное применение микроэлементов в виде неорганических солей недостаточно эффективно и менее технологично по сравнению с хелатной формой, которая обладает высокой биологической активностью и обеспечивает лучшую доступность микроэлементов для растений [8]. Одним из способов повышения эффективности микроэлементов в обоих видах является их введение в состав жидких и гранулированных гуминовых удобрений.

Цель работы – исследовать влияние форм и концентраций микроэлементов в составе гранулированных органоминеральных удобрений на их переход из гранул в водный раствор и его биологическую (ростстимулирующую) активность для обоснования составов и технологии получения новых видов органоминеральных удобрений, обеспечивающих экономии питательных веществ за счет уменьшения их вымывания и охраны окружающей среды.

Материалы и методы исследований. С целью создания гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа с содержанием микроэлементов (медь, цинк) в хелатной и солевых формах использовали низинный торф торфяного месторождения Гало-Ковалевское (влажность – 55 %, степень разложения – 35 %). В качестве источника меди и цинка были выбраны соли $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, которые вносили в виде водного раствора в торф. В качестве хелатообразующего агента использовали динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (Трилон Б). Его вводили в раствор в эквивалентном количестве по отношению к микроэлементу. Содержание Cu^{2+} и Zn^{2+} варьировалось в диапазоне 0,5–3,5 г/кг на сухое вещество гранул комплексных гранулированных удобрений (КГУ). Минеральные компоненты NPK вводили в соотношении 1,5 : 1,0 : 1,5. Полученные смеси тщательно перемешивали и подвергали грануляции. Затем приготовленные гранулы разделяли

на четыре образца, которые сушили до постоянного веса в термостатируемом шкафу при разных температурах: 25 °С, 90 °С, 110 °С и 125 °С.

Для оценки эффективности пролонгированного действия КГУ из полученных удобрений готовили серию растворов в динамическом (промывном режиме), моделирующем вымывание водорастворимых веществ.

Приготовление серии растворов: в колбы на 250 мл помещали навески КГУ, заливали дистиллированной водой с гидромодулем в соотношении 1 : 10 и оставляли настаиваться. Через 24 ч фильтровали через фильтр белая лента, полученный фильтрат использовали для определения pH, оптической плотности (D440) и содержания растворенного микроэлемента. Концентрацию меди и цинка в растворах определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре ZEE net Р методом абсолютных калибровок для соответствующих элементов. После измерения всех показателей снова добавляли к гранулам дистиллированную воду в том же соотношении, оставляли настаиваться на 72 ч. Затем фильтровали и определяли показатели, повторяли аналогично с промежутком настаивания еще 168 ч. Общее время оценки перехода микроэлемента в водный раствор составляло 432 ч. Вымываемость микроэлемента (%) рассчитывали по формуле

$$C_p / C_{исх} \cdot 100,$$

где C_p – концентрация микроэлемента в водном растворе за время экспозиции, мг/л; $C_{исх}$ – концентрация микроэлемента в гранулах КГУ, г/кг.

Для определения биологической активности гранул КГУ семена озимой ржи сорта Паўлінка в чашках Петри обрабатывали 10 мл разбавленных растворов и помещали в термостат при температуре 25 °С. Повторность опыта – трехкратная. Контрольный вариант обрабатывали 10 мл дистиллированной воды. На 3-й день эксперимента определяли энергию прорастания семян, на 7-й день – всхожесть.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования показали (рис. 1, а), что минимальная вымываемость ионов меди в солевой форме из гранул КГУ за 432 ч экспозиции в промывном режиме для всех диапазонов концентрации наблюдается при температуре сушки гранул 25 °С и колеблется в пределах 2,5–3,1 %. Увеличение температуры сушки гранул до 90 °С повышает величину перехода ионов меди в водорастворимую форму до 8,7–10,6 % для всех диапазонов содержания микроэлемента в КГУ. Наблюдается некоторое снижение вымываемости ионов меди из гранул, полученных при температуре сушки 125 °С, которая составляет 8,4–8,8 %. Это может быть связано с более прочным закреплением меди в гранулах КГУ с ростом температуры термической обработки. Максимальный переход ионов меди в водные экстракты отмечен при ее содержании 1,5 мг/г КГУ, температуре сушки 110 °С и составляет 11,6 %. Полученная зависимость перехода ионов меди в водные экстракты свидетельствует о том, что через 18 сут в динамическом режиме промывки около 90 % ионов меди остается в гранулах КГУ. Таким образом, подтверждается пролонгированность процесса перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты в доступной для растений форме.

Результаты исследования показали (рис. 1, б), что вымываемость иона меди из гранул КГУ в хелатной форме в 7–25 раз выше, чем для солевой, что свидетельствует о переходе микроэлемента в водорастворимую форму и доступности его для растений. Минимальная вымываемость за 432 ч экспозиции наблюдается при температуре сушки 125 °С и увеличивается от 57,3 до 73,5 % с ростом содержания микроэлемента в гранулах КГУ. Это может быть связано с более прочным закреплением меди в гранулах КГУ при более высокой температуре термической обработки.

Уменьшение температуры сушки гранул до 90 °С повышает величину перехода меди в водорастворимую форму до 74,0–86,0 % для диапазона содержания микроэлемента 0,5–2,5 мг/г в КГУ. При содержании меди в хелатной форме 3,5 мг/г в КГУ наблюдается некоторое снижение вымываемости ионов меди из гранул, полученных при всех температурах сушки, которая составляет 73,5–76,4 %. Максимальный переход ионов меди в водные экстракты отмечен при ее содержании 0,5 мг/г КГУ, температуре сушки 90 °С и составляет 86,0 %. Полученная зависимость перехода ионов меди в водные экстракты свидетельствует о том, что через 18 сут в динамическом режиме промывки около 75–86 % ионов меди вымывается из КГУ. Таким образом, эффект пролонгированности процесса перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты для хелатной формы меди значительно ниже, чем для солевой формы меди.

На рис. 2, а представлена зависимость вымываемости ионов цинка от содержания цинка в гранулах КГУ, высушенных при температурах 25 °С, 90 °С, 110 °С и 125 °С. Результаты исследования показали, что минимальная вымываемость за 432 ч экспозиции для всех диапазонов концентрации наблюдается при температуре сушки 90–125 °С и колеблется в пределах 1,5–2,3 %. Это может быть связано с прочным закреплением цинка в гранулах КГУ с ростом температуры термической обработки.

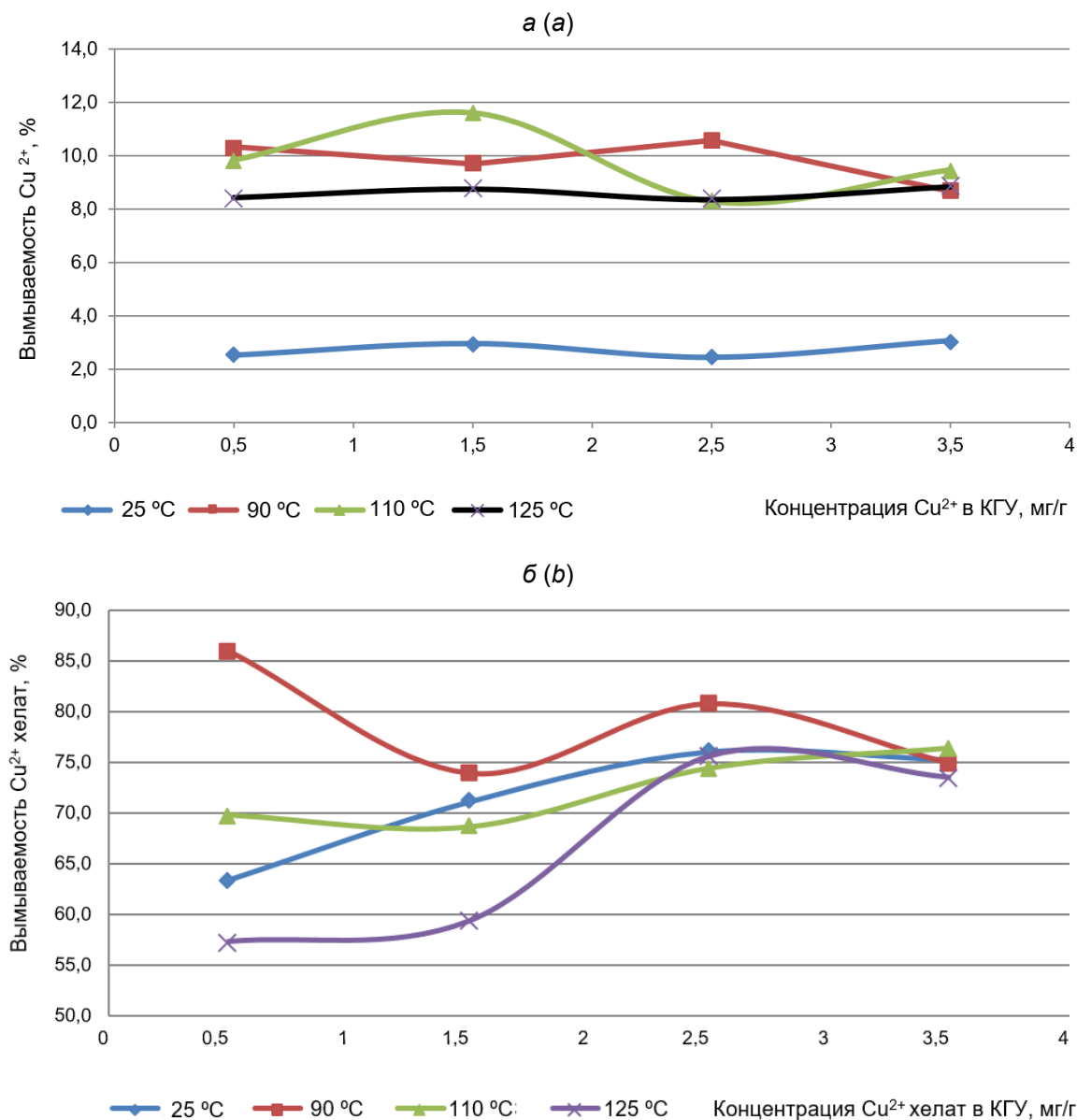


Рис. 1. Зависимость вымываемости ионов меди в солевой (а) и хелатной (б) фориз гранул КГУ от содержания меди в них при температуре сушки 25 °C, 90 °C, 110 °C и 125 °C за время экспозиции 432 ч

Fig. 1. Dependence of copper ions extraction in salt (a) and chelate (b) forms from CGF granules on the copper content in them at drying temperatures of 25 °C, 90 °C, 110 °C and 125 °C during an exposure time of 432 hours

Уменьшение температуры сушки гранул до 25 °C повышает величину перехода ионов цинка в водорастворимую форму до 8,9; 12,2; 16,3 и 19,5 % для содержания микроэлемента в КГУ 0,5; 1,5; 2,5 и 3,5 мг/г соответственно. Максимальный переход ионов цинка в водные экстракты отмечен при его содержании 3,5 мг/г КГУ, температуре сушки 25 °C и составляет 19,5 %. Полученная зависимость перехода Zn^{2+} в водные экстракты свидетельствует о том, что через 18 сут в динамическом режиме промывки около 80 % ионов цинка остается в гранулах КГУ, полученных при температуре сушки 25 °C, и до 98 % ионов цинка остается в гранулах КГУ, полученных при температуре сушки 90–125 °C. Таким образом, наблюдается пролонгированность процесса перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты, но его количество в водорастворимой, доступной для растений форме снижается.

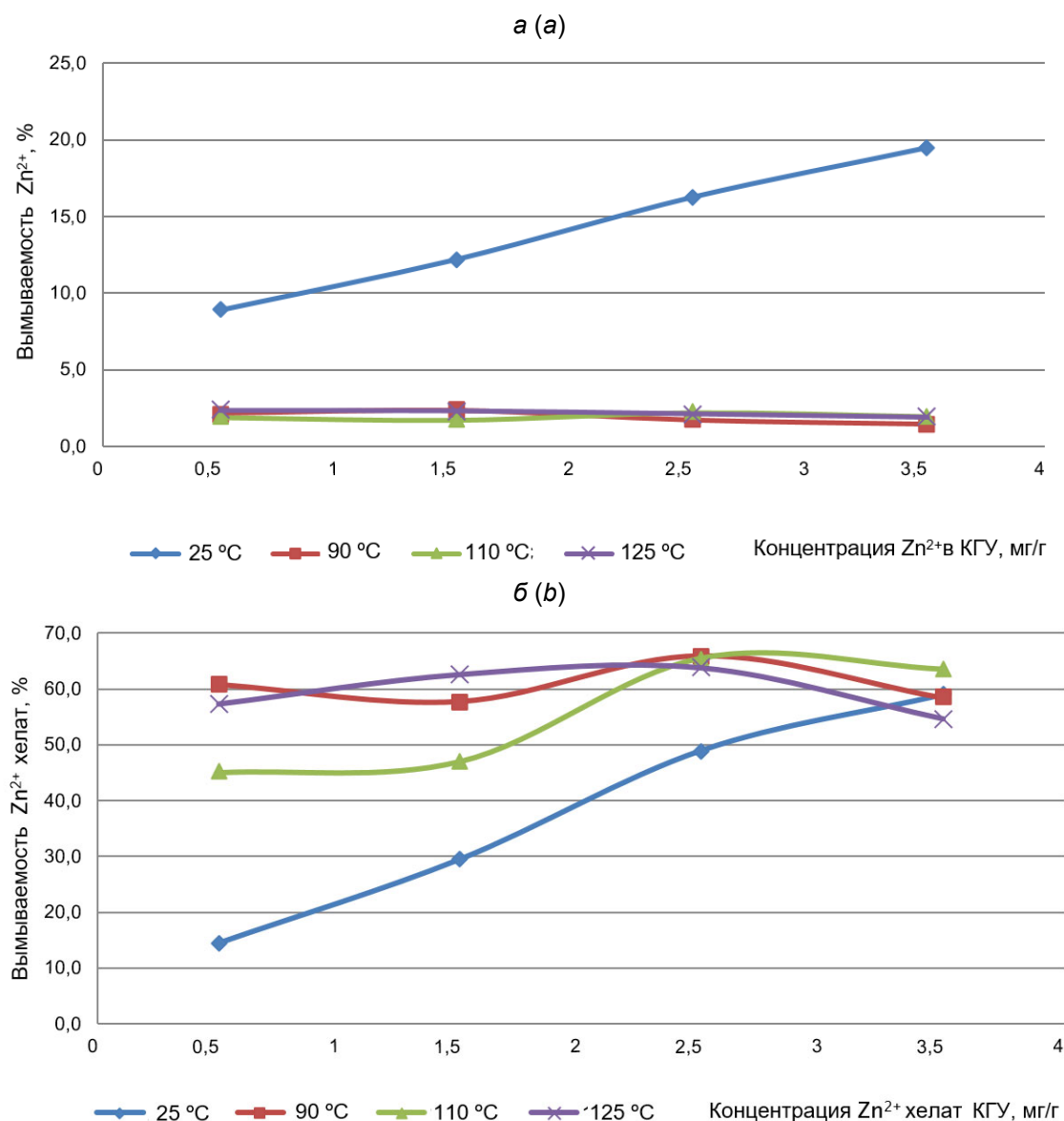


Рис. 2. Зависимость вымываемости ионов цинка в солевой (а) и хелатной (б) формах из гранул КГУ от содержания цинка в них при температуре сушки 25 °C, 90 °C, 110 °C и 125 °C за время экспозиции 432 ч

Fig. 2. Dependence of zinc ions extraction in salt (a) and chelate (b) forms from CGF granules on the zinc content in them at drying temperatures of 25 °C, 90 °C, 110 °C and 125 °C during an exposure time of 432 hours

Результаты исследования показали (рис. 2, б), что вымываемость иона цинка из гранул КГУ в хелатной форме в 1,5–3,0 раза выше, чем для солевой, при температуре сушки гранул 25 °C и в 18–25 раз выше при температуре сушки гранул 90–125 °C, что свидетельствует о высокой степени перехода микроэлемента в водорастворимую форму и доступности его для растений. Минимальная вымываемость за 432 ч экспозиции наблюдается при температуре сушки 25 °C и увеличивается от 14,7 до 58,4 % с ростом содержания микроэлемента в гранулах КГУ с 0,5 до 3,5 мг/г.

Вымываемость Zn^{2+} в хелатной форме для образцов, полученных при температуре сушки 90 °C и 125 °C, практически не зависит от содержания цинка в КГУ и колеблется в диапазоне 54,6–65,5 % для всех исследованных концентраций. Максимальный переход ионов цинка в водные экстракты отмечен при его содержании 2,5 мг/г КГУ, температуре сушки 90 °C и составляет 65,5 %. Полученная зависимость перехода ионов цинка в хелатной форме в водные экстракты свидетельствует о том, что через

18 сут в динамическом режиме промывки около 55–65 % Zn^{2+} вымывается из КГУ. Таким образом, процесс перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты для хелатной формы цинка значительно ниже, чем для солевой формы цинка.

Результаты исследований биологической активности водных экстрактов из гранул КГУ показали (табл. 1, 2), что энергия прорастания максимальна при следующих концентрациях $CuSO_4$: 0,5–2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °С; 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная энергия прорастания наблюдалась для каждого варианта опыта при разных концентрациях $CuSO_4$ и температурах сушки гранул, но ниже контрольной она была только в варианте с концентрацией 3,5 мг/кг и температурой сушки гранул 25 °С.

Таблица 1. Влияние меди на энергию прорастания и всхожесть растений (озимая рожь) в зависимости от ее формы и концентрации

Table 1. The effect of the copper on the germination and germination power of plants (winter rye) in dependence upon its form and concentration

Концентрация Cu^{2+} , мг/кг КГУ	Температура сушки, °С	$CuSO_4$		Cu-хелат	
		Энергия прорастания	Всхожесть	Энергия прорастания	Всхожесть
		% к контролю			
0,5	25	108,9	109,4	133,3	119,8
	90	104,4	110,3	123,3	113,6
	110	110,4	103,8	128,8	112,3
	125	117,5	110,0	109,1	104,9
1,5	25	114,9	110,3	133,3	113,6
	90	114,1	109,4	130,3	115,3
	110	118,3	110,3	128,2	109,4
	125	117,5	111,5	110,6	108,6
2,5	25	101,0	98,3	122,1	106,4
	90	101,8	103,1	127,3	113,6
	110	100,5	100,7	114,2	104,4
	125	107,0	101,9	93,9	88,9
3,5	25	98,4	99,8	134,8	117,3
	90	105,7	99,5	131,8	116,0
	110	114,9	112,7	135,5	114,3
	125	111,5	107,9	124,2	114,8
Контроль	–	100	100	100	100

Всхожесть максимальна при концентрациях 0,5–1,5 мг/кг $CuSO_4$ для гранул, высушенных при температуре 125 °С, при концентрациях $CuSO_4$ 2,5–3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная всхожесть отмечена при концентрациях 0,5 и 2,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 110 °С, при концентрациях 1,5 и 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С. Ниже контрольной всхожесть была в вариантах с концентрацией 2,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, и с концентрацией 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температурах 25 °С и 90 °С.

При использовании меди в виде хелата максимальная энергия прорастания отмечена при концентрациях 0,5–1,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрации 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С, а при концентрации 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °С. Минимальная энергия прорастания наблюдалась на всех вариантах опыта для гранул, высушенных при температуре 125 °С, но ниже контрольной она была только в варианте с концентрацией 2,5 мг/кг.

Всхожесть максимальна при концентрациях хелата меди 0,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрациях 1,5 и 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С. Минимальная всхожесть отмечена при концентрациях 0,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °С, при концентрациях 1,5 и 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °С. Ниже контрольной всхожесть была только в варианте с концентрацией 2,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °С.

Таблица 2. Влияние цинка на энергию прорастания и всхожесть растений (озимая рожь) в зависимости от его формы и концентрации**Table 2. The effect of the zinc on the germination and germination power of plants (winter rye) in dependence upon its form and concentration**

Концентрация Zn^{2+} , мг/кг КГУ	Температура сушки, °C	ZnSO ₄		Zn-хелат	
		Энергия прорастания	Всхожесть	Энергия прорастания	Всхожесть
		% к контролю			
0,5	25	91,8	93,8	113,1	104,2
	90	133,2	116,6	111,6	105,2
	110	103,6	104,7	127,8	123,4
	125	132,1	115,6	134,4	126,1
1,5	25	108,9	100,0	130,8	119,3
	90	121,4	118,8	105,7	100,8
	110	118,9	110,3	103,1	100,8
	125	96,4	84,4	117,9	109,2
2,5	25	121,4	106,3	111,6	106,6
	90	126,1	111,6	123,4	112,6
	110	120,4	111,6	124,1	115,3
	125	66,1	78,1	81,0	73,9
3,5	25	114,3	106,3	110,5	101,8
	90	108,9	114,1	114,2	107,6
	110	121,4	117,7	135,2	126,7
	125	82,1	81,3	89,0	82,4
Контроль	—	100	100	100	100

В вариантах опыта с цинком (см. табл. 2) энергия прорастания максимальна при концентрациях 0,5–2,5 мг/кг ZnSO₄ для гранул, высушенных при температуре 90 °C, при концентрации ZnSO₄ 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °C. Минимальная энергия прорастания наблюдалась при концентрации 0,5 мг/кг ZnSO₄ для гранул, высушенных при температуре 25 °C, при концентрации ZnSO₄ 1,5–3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °C. В этих вариантах энергия прорастания была ниже контрольной.

Минимальные и максимальные значения всхожести были аналогичными. Ниже контрольной всхожесть была в вариантах с концентрацией 0,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 25 °C, и с концентрациями 1,5–3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °C. По-видимому, при высокой температуре сушки гранулы с цинком дают в водных растворах слишком высокую концентрацию Zn^{2+} , оказывающую на зерна угнетающее действие.

При использовании цинка в виде хелата энергия прорастания максимальна при концентрациях 0,5 мг/кг Zn-хелата для гранул, высушенных при температуре 125 °C, при концентрации 1,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 25 °C, при концентрациях Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °C. Минимальная энергия прорастания наблюдалась при концентрации 0,5 мг/кг Zn-хелата для гранул, высушенных при температуре 90 °C, при концентрации 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °C, при концентрациях Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 125 °C. В двух последних вариантах энергия прорастания была ниже контрольной.

Всхожесть максимальна при концентрации Zn-хелата 0,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °C, при концентрации 1,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 25 °C, при концентрации 2,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90 °C, и при концентрации Zn-хелата 3,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 110 °C. Минимальная всхожесть отмечена при концентрациях 2,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °C, при концентрации 0,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 25 °C, при концентрации Zn-хелата 1,5 мг/кг – для гранул, высушенных при температуре 90–110 °C. Ниже контрольной всхожесть, как и энергия прорастания, была в вариантах с концентрациями Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг для гранул, высушенных при температуре 125 °C.

По-видимому, концентрации Zn-хелата 2,5 и 3,5 мг/кг в сочетании с высокой температурой сушки гранул дают в водных растворах слишком высокую концентрацию Zn^{2+} , оказывающую на зерна угнетающее действие.

Также следует отметить более быстрое ростстимулирующее воздействие хелата цинка: разница между энергией прорастания и всхожестью не превышает 4 %, в то время как для хелата меди эта разница может достигать 11 %.

Таким образом, при использовании меди и цинка в виде неорганической соли максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низких их концентраций при температуре сушки гранул КГУ 90–125 °С, для высоких концентраций – при 110 °С.

При использовании меди в виде хелата максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой и высокой концентраций при температуре сушки гранул КГУ 25 °С, для средних концентраций – при 90–110 °С.

При использовании хелата цинка максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 125 °С, для высокой концентрации – при 110 °С.

Заключение. Проведенные исследования по изучению влияния исходного содержания в солевой и хелатной формах микроэлементов (медь, цинк) в составе КГУ на переход микроэлемента в водный раствор показали, что за 432 ч наблюдения максимальная величина вымываемости ионов меди в солевой форме составляет 11,6 % при ее содержании 1,5 мг/г КГУ и температуре сушки 110 °С, что подтверждает пролонгированность перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты в доступной для растений форме. Процесс перехода микроэлемента из гранул в водные экстракты для хелатной формы меди значительно выше, чем для солевой формы меди, и вымываемость составляет 57,3–86,0 % для всех исследованных концентраций и температур. Минимальная вымываемость наблюдается при температуре сушки 125 °С и увеличивается от 57,3 до 73,5 % с ростом содержания микроэлемента в гранулах КГУ.

Температурная обработка гранул КГУ при 90–125 °С препятствует растворимости ионов цинка в солевой форме и приводит к резкому снижению концентрации микроэлементов в водных экстрактах для всех исследованных диапазонов его содержания, и величина вымываемости колеблется в пределах 1,5–2,3 %. При содержании цинка в хелатной форме 0,5 мг/г КГУ вымываемость ионов Zn^{2+} увеличивается с повышением температуры сушки и составляет 14,6; 45,0; 57,3 и 60,3 % для образцов с температурой 25 °С, 110 °С, 125 °С и 90 °С соответственно за 432 ч экспозиции. Переход микроэлемента из гранул КГУ в водные экстракты для хелатной формы цинка значительно выше, чем для солевой формы цинка.

При использовании меди и цинка в виде неорганической соли максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низких их концентраций при температуре сушки гранул КГУ 90–125 °С, для высоких концентраций – при 110 °С. При использовании меди в виде хелата максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой и высокой концентраций при температуре сушки гранул КГУ 25 °С, для средних концентраций – при 90–110 °С. При использовании хелата цинка максимальная биологическая (ростстимулирующая) активность отмечалась для низкой концентрации при температуре сушки гранул КГУ 125 °С, для высокой концентрации – при 110 °С.

Замедление вымываемости микроэлементов имеет большое значение с точки зрения минимизации их поступления в окружающую среду, что позволит существенно снизить загрязнение поверхностных и подземных вод сельскохозяйственных районов компонентами, содержащимися в минеральных удобрениях.

Список использованных источников

1. Багдевiч, И. М. Обеспеченность пахотных и луговых почв подвижными формами цинка в зависимости от уровня интенсификации земледелия по районам Беларуси / И. М. Багдевiч, О. Л. Ломонос // Весці НАН Беларусі. Сер. агр. навук. – 2015. – № 1. – С. 41–52.
2. Применение комплексных гуминовых удобрений «ЭлеГум»: рекомендации / М. В. Рак [и др.] ; Нац. акад. наук Беларусі, Ин-т природопользования, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2013. – 28 с.
3. Клечковский, В. М. Агрохимия / В. М. Клечковский, А. В. Петербургский. – М. : Колас, 1967. – 584 с.
4. Радов, А. С. Практикум по агрохимии : учеб пособие / А. С. Радов, И. В. Пустовой, А. В. Корольков ; под ред. А. С. Радова. – М. : Колас, 1978. – 258 с.
5. Минеев, В. Г. Особенности динамики соединений меди в агроценозах на дерново-подзолистых почвах при длительном применении удобрений / В. Г. Минеев, Н. А. Едемская, Е. А. Карпова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2015. – № 4. – С. 3–19.
6. Рекомендации по допустимому содержанию цинка и меди в почве при возделывании зерновых культур и многолетних трав / С. Е. Головатый [и др.] ; Нац. акад. наук Беларусі, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2006. – 43 с.

7. Кайгородов, Р. В. Накопление цинка и меди у злаков в условиях повышенного поступления микроэлементов в агроэкосистемы Нижней Саксонии (Германия) / Р. В. Кайгородов // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 2. – С. 51–52.
8. Мишура, О. И. Эффективность применения микроудобрений в хелатной форме при возделывании кукурузы / О. И. Мишура // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 1 (46). – С. 231–236.

References

1. Bagdevich I. M., Lomonos O. L. *Obespechennost' pahotnyh i lugovyh poch v podvizhnyimi formami cinka v zavisimosti ot urovnya intensifikatsii zemledeliya po rayonam Belarusi* [Provide with mobile forms of zinc of arable and meadow soils in dependence upon level of agriculture intensification in regions of Belarus]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. agr. navuk = Vesti NAS of Belarus. Series of Agricultural Sciences*, 2015, pp. 41–52. (in Russian)
2. Rak M. V., Lapa V. V., Sokolov G. A. *Primenenie kompleksnyh guminovyh udobreniy "EleGum"* [Use of complexhumic fertilizers "EleGum"]. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Nature Management, Institute for Soil Science and Agrochemistry. 2013, 28 p. (in Russian)
3. Klechkovskij V. M., Peterburgskij A. V. *Agrokhimiya* [Agrochemistry]. Moscow, Kolas Publ., 1967, 584 p. (in Russian)
4. Radov A. S., Pustovoj I. V., Korol'kov A. V. *Praktikum po agrokhimii* [The workshop of agrochemistry]. Moscow, Kolas Publ., 1978, 258 p. (in Russian)
5. Mineev V. G., Edemskaya N. A., Karpova E. A. *Osobennosti dinamiki soedinenij medi v agroceozah na dernovo-podzolistykh pochvah pri dlitel'nom primenenii udobrenij* [Features of the dynamics of copper compounds in agroceozes on sod-podzolic soils with long-term use of fertilizers]. *Problems of Agrochemistry and Ecology = Problems of Agrochemistry and Ecology*, 2015, no. 4, pp. 3–19. (in Russian)
6. Golovaty S. E., Bogdevich I. M., Kovalevich Z. S., Slobodnitskaya G. V. *Rekomendacii po dopustimomu sodержaniyu cinka i medi v pochve pri vozdelevanii zernovykh kul'tur i mnogoletnih trav* [Recommendations on the permissible content of zinc and copper in the soil when cultivating grain crops and perennial grasses]. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Minsk, 2006, 43 p. (in Russian)
7. Kaygorodov R. V. *Nakoplenie cinka i medi u zlakov v usloviyakh povyshennogo postupleniya mikroelementov v agroekosistemy Nizhnej Saksonii (Germaniya)* [Accumulation of zinc and copper in cereals under conditions of increased supply of microelements to the agroecosystems of Lower Saxony (Germany)]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2006, no. 2, pp. 51–52. (in Russian)
8. Mishura O. I. *Effektivnost' primeneniya mikroudobrenij v helatnoj forme pri vozdelevanii kukuruzy* [Efficiency of using microfertilizers in chelated form when cultivating corn]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2011, no. 1 (46), pp. 231–236. (in Russian)

Информация об авторах

Сосновская Наталья Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Красноберская Ольга Георгиевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

Ракович Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией биогеохимии и агроэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mire4@tut.by

Information about the authors

Natalia E. Sosnovskaya – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Olga G. Krasnoberskaya – Ph. D. (Agricultural), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

Vyacheslav A. Rakovich – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Head of Lab. of Biogeochemistry and Agroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mire4@tut.by

ФЕРРОГУМАТСОДЕРЖАЩИЙ ПРЕПАРАТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВЕТЕРИНАРИИ

Н. А. Жмакова¹, Н. Л. Макарова¹, М. П. Кучинский², Г. М. Кучинская²

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского, Минск, Беларусь

Аннотация. В животноводстве для лечения и профилактики анемии широко используются неорганические и органические соли железа, а также его комплексные соединения с декстринами и полимерами разного строения. Средства для профилактики и лечения анемии у животных могут быть созданы на основе комплексов железа с гуминовыми веществами.

Предложены технологические режимы окисления торфа, обеспечивающие значительное увеличение количества кислородсодержащих функциональных групп в составе гуминовых кислот. Разработан способ введения в жидкий гуминовый препарат ионов железа. В качестве железосодержащего соединения использован свежеприготовленный гидроксид железа (III), получаемый при взаимодействии хлорида железа (III) с гидроксидом натрия. Предварительная оценка лечебной эффективности феррогуматсодержащего препарата на лабораторных животных против экспериментальной железодефицитной анемии показала, что он содержит усвояемое организмом животных железо, способное связываться с белками крови и включаться в процессы кроветворения. Оральное применение белыми крысами феррогумата в течение 5 дней из расчета 0,7 мг железа на голову в сутки активизирует кроветворную систему животных. Выпаивание белым крысам феррогумата в течение 10 дней (два курса по 5 дней с интервалом 2 сут) в той же дозе увеличивает запасные фонды железа и нивелирует проявление экспериментальной железодефицитной анемии, что подтверждается результатами лабораторного исследования крови.

Ключевые слова: торф; гуминовые вещества; функциональные группы; феррогуматсодержащий препарат; соли железа; анемия; лабораторные животные; анализ крови.

Для цитирования. Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Кучинский М. П., Кучинская Г. М. Феррогуматсодержащий препарат и перспективы его использования в ветеринарии // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 164–175.

FERROHUMATE-CONTAINING PREPARATION AND PROSPECTS OF ITS USE IN VETERINARY MEDICINE

N. A. Zhmakova¹, N. L. Makarova¹, M. P. Kuchinsky², G. M. Kuchinskaya²

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

²S. N. Vyshellessky Institute of Experimental Veterinary Science, Minsk, Belarus

Abstract. Inorganic and organic salts of iron, as well as its complex compounds with dextrans and various polymers are widely used in animal breeding for the treatment and prevention of anemia. Means for prevention and treatment of anemia in animals can be created on the base of iron complexes with humic substances.

Technological parameters of peat oxidation have been established, in the process of which there is a significant increase in the amount of oxygen-containing functional groups in the composition of humic acids. The method of introduction of iron ions into liquid humic preparation was developed. Freshly prepared iron (III) hydroxide obtained by interaction of iron (III) chloride with sodium hydroxide was used as an iron-containing compound. Preliminary evaluation of the therapeutic efficacy of ferrohimate-containing preparation on laboratory animals against experimental iron deficiency anemia showed that it contains iron assimilable by an animal body, capable of binding to blood proteins and being included in the processes of hematopoiesis. Oral administration of ferrogumate to white rats for 5 days at the rate of 0.7 mg of iron per head per day activates the hematopoietic system of animals. Oral administration of ferrogumate to white rats for 10 days (two courses of 5 days with an interval of 2 days) at the same dose increases iron reserves and levels the manifestation of experimental iron deficiency anemia, which is confirmed by the results of laboratory blood tests.

Keywords: peat; humic substances; functional groups; ferrohimate preparation; iron salts; anemia; laboratory animals; blood analysis.

For citation. Zhmakova N. A., Makarova N. L., Kuchinsky M. P., Kuchinskaya G. M. Ferrohimate-containing preparation and prospects of its use in veterinary medicine. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 164–175.

Введение. Одной из проблем современного животноводства является заболевание животных, и особенно молодняка, анемией, которая характеризуется уменьшением содержания в крови гемоглобина и эритроцитов. У анемического состояния могут быть многообразные причины, однако одной из наиболее распространенных является недостаточное содержание железа в рационе животных, в результате чего снижается его уровень в сыворотке крови, костном мозге и других депо. При дефиците железа нарушается образование гемоглобина, эритроцитов, возникает гипохромная анемия, состояние гипоксии и развиваются трофические расстройства в тканях, приводящие к нарушению окислительно-восстановительных процессов.

Потребность в железе очень велика у молодых, интенсивно растущих животных, особенно поросят, масса тела которых после рождения удваивается за 6–8 дней и сопровождается увеличением общего количества крови. Для поддержания нормального уровня гемоглобина в крови, а также для восполнения других потребностей (на образование миоглобина, ферментов и т. д.) молодняк должен ежедневно усваивать 6–10 мг железа. При дефиците железа в первые недели жизни у животных развивается физиологическая анемия, которая становится причиной 20–30 % всех потерь молодняка. Профилактический прием железосодержащих препаратов удовлетворяет потребности организма в этом элементе и препятствует возникновению физиологической анемии [1].

Прием таких препаратов должен строго контролироваться, так как безопасный диапазон содержания железа в организме достаточно узок и опасность представляет как дефицит железа, так и его переизбыток. Соединения железа токсичны и могут вызвать отрицательные последствия, вплоть до летального исхода.

В настоящее время в животноводстве для предупреждения и лечения анемии используют различные лекарственные средства. К первому поколению препаратов относятся неорганические формы железа (железо сернокислое, оксиды). Эти препараты являются наиболее токсичными. Ко второму поколению относятся органические соли железа: глюконат, ферронат, лактат (железо молочнокислое закисное), глицерофосфат, диглутамат и др. К третьему поколению принадлежат препараты, содержащие двухвалентное железо, закрепленное на водорастворимых полимерах декстрина, других полимерах, на специальных полимерных губкообразных основах. Эти препараты обеспечивают постепенное освобождение железа, однако обладают недостаточными гемостимулирующими свойствами и малоэффективны как противоанемийные ветеринарные средства. Четвертое поколение представлено органическими комплексами, в которых железо сочетается с синергидными компонентами. В настоящее время такие комплексы разработаны для лечения людей, а создание их для животных является задачей ближайшего будущего [1–3].

Средства для профилактики и лечения анемии у животных могут быть созданы на основе комплексов железа с гуминовыми веществами – сложными природными полиэлектролитами, содержащими различные функциональные группы, которые определяют их ионообменные свойства. Роль ионообменных центров выполняют в основном карбоксильные и гидроксильные группы, подвижный протон которых способен замещаться другими катионами. К ионному обмену способны и другие компоненты торфа – сложные эфиры, лактоны, амиды и другие соединения, которые и составляют обменный комплекс торфа [4]. В связи с этим на основе гуминовых веществ можно создать комплексы с железом для профилактики и лечения анемии у животных, которые будут снижать его токсическое действие за счет постепенного освобождения железа в организме. Важным преимуществом препаратов на основе гуминовых веществ является высокая физиологическая активность этих соединений, а также стимулирующее воздействие на организм животных. Исследования, проведенные в животноводстве, ветеринарии и медицине, убедительно доказывают эффективность и перспективность использования гуминовых препаратов из торфа в качестве биологически активных кормовых добавок, иммуномодуляторов, регуляторов метаболизма, гепатопротекторов, адаптогенов. Эти препараты положительно воздействуют на обменные процессы в организме животных, корректируют последствия недостаточного и несбалансированного кормления, нарушение зооигиенических условий содержания, стрессовых явлений. Под их влиянием улучшаются иммунный статус и общее состояние организма, повышаются энергетический обмен, компенсаторные возможности внутренних органов, тканей и всего организма в целом [4, 5]. В настоящее время гуминовые препараты широко используются в животноводстве и ветеринарии.

Цель работы – создать способ получения феррогуматсодержащего комплекса с массовой долей железа 50–60 мг/мл и провести его первичные испытания в качестве профилактического средства от железодефицитной анемии животных.

Материалы и методы исследований. Пробы торфа отобраны на торфопредприятии ОАО «Днепровское» Могилёвской области на месторождениях «Зимник северный» и с участка «Трилесино» Мстиславского района. Всего отобрано три образца торфа: два низинного типа (образцы № 1 и № 2) и один – верховой (образец № 3).

Геоботаническая характеристика проб торфа, включающая определение ботанического состава и вида торфа в соответствии с ботанической классификацией и степени его разложения, выполнена в лаборатории использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений. 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	Осоки – 45; тростник – 35; древесные – 10; сфагновые – 5; гипновые мхи – 5	Тростниково-осоковый	Низинный	25–30
2	Тростник – 45; осоки – 20; древесные – 35; кустарничковые – редко	Древесно-тростниковый	Низинный	35–40
3	Сфагновые мхи – 75; кустарничковые – 10; пушица – 10; травянистые – 5	Сфагновый	Верховой	25–30

Определение массовой доли влаги торфа проводили в соответствии с действующим типовым методом. При определении влаги торфа пробу измельчали путем растирания в яшмовой ступке, просеивали через сито с размером ячеек 0,25 мм. В бюксы отбирали пробы массой 1,5–2,0 г и взвешивали с точностью до 0,0002 г. Подготовленные материалы высушивали в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С до постоянной массы и вычисляли в процентах потери массы взятой навески.

Метод определения массовой доли золы заключался в полном сжигании навески образца торфа или мха в муфельной печи при температуре 800 ± 25 °С и прокаливании зольного остатка до постоянной массы при той же температуре. Зольность определяли по процентному соотношению массы остатка, образующегося при прокаливании, к общей массе взятого образца. Массовую долю органического вещества образца определяли как разность сухого вещества и золы.

Сущность метода определения активной кислотности заключалась в приготовлении водной торфяной суспензии и потенциометрическом измерении величины pH.

Для извлечения гуминовых веществ из торфа использовали стандартную методику. Гуминовые кислоты выделяли трехкратной обработкой 0,1 н. раствором гидроксида натрия при соотношении торф : жидкость 1 : 150 и температуре 80–90 °С в течение 1 ч. Фильтраты соединяли, отбирали аликвотную часть в фарфоровые чашки для выпаривания и последующей сушки. Массовую долю извлеченных гуминовых веществ определяли весовым методом. Затем щелочной экстракт подкисляли соляной кислотой до pH 1,0–2,0 для осаждения гуминовых кислот, осадок отделяли, промывали на фильтре дистиллированной водой до исчезновения ионов хлора в промывных водах, сушили до постоянной массы и определяли содержание гуминовых кислот весовым методом. В фильтрате определяли содержание фульвокислот.

Окисление торфа проводили в специальных герметически закрывающихся толстостенных сосудах из нержавеющей стали объемом 500 см³. Твердый остаток отделяли центрифугированием, а жидкую фазу (оксидат) использовали в качестве целевого продукта.

Из раствора препарата гуминовые кислоты осаждали путем подкисления 4%-ной соляной кислотой до pH 2,0. Осадок сушили на воздухе, отмывали дистиллированной водой до исчезновения ионов хлора в промывных водах, а затем вновь сушили при температуре 18–20 °С.

Сорбционную емкость гуминовых кислот оценивали по содержанию функциональных групп: карбоксильных и фенольных гидроксильных. Определение суммарного содержания карбоксильных и гидроксильных групп в гуминовых кислотах торфов и в гуминовом препарате осуществляли по методике, в которой их содержание определяется количеством гидроксида бария, поглощенного 1 г гуминовых кислот. Содержание карбоксильных групп определяли по величине емкости поглощения кальция из его уксуснокислой соли. Массовую долю фенольных гидроксильных групп находили по разности между суммарным содержанием функциональных групп и карбоксильных [6].

Массовую долю железа в препарате определяли в сертифицированной лаборатории ПОО «Бел-интераналит» на атомно-эмиссионном многоканальном спектрометре.

Испытания острой токсичности феррогуматсодержащего препарата проводили на белых беспородных мышах массой 18–21 г в условиях вивария РУП «Институт экспериментальной ветеринарии имени С. Н. Вышелесского». Исследования выполняли согласно нормативному документу [7]. Феррогумат вводили белым мышам внутрижелудочно с помощью шприца с иглой-зондом 1–6 раз в течение 12 ч с интервалом 1,5–2,0 ч в дозах, начиная с 40 000 мг/кг массы и заканчивая 240 000 мг/кг массы тела. Животным контрольной группы вводили внутрижелудочно по 0,8 мл дистиллированной воды 6 раз с промежутком 1,5 ч. Количество животных в каждой группе – 6. Среднесмертельную дозу (LD_{50}) препарата рассчитывали по методу Кёрбера [8]. Класс опасности определяли по [9].

Оценку профилактической и лечебной эффективности феррогуматсодержащего препарата при экспериментальной железодефицитной анемии проводили на 20 самках крыс живой массой 175–240 г. После индивидуального взвешивания животных разделяли на три группы по 6–7 особей в каждой. В начале опыта от 6 крыс (по 2 из каждой группы) из хвостовой вены отбирали пробы крови для морфологического анализа. Животные 1-й группы ($n = 6$) служили в качестве контроля. Опытным крысам 2-й и 3-й групп ($n = 7$) в течение 5 сут выпаивали с водой испытуемый феррогуматсодержащий препарат из расчета 0,7 мг железа на голову в сутки (0,12 мл препарата на группу), что эквивалентно 2,8 суточной дозы для данного вида животных. Через сутки после последней выпойки препарата от крыс контрольной и опытных групп повторно отбирали пробы крови ($n = 5$) и животным 2-й и 3-й групп для моделирования экспериментальной железодефицитной анемии подкожно вводили 2%-ный водный раствор солянокислого фенилгидразина из расчета 0,2 мл на голову, что соответствует примерно 20 мг фенилгидразина на 1 кг массы. Крысам опытных групп через сутки вводили повторно 2%-ный раствор фенилгидразина в той же дозе. Спустя 24 ч феррогуматсодержащий препарат продолжали выпаивать только опытным крысам 3-й группы из расчета 0,7 мг железа на голову в течение 5 дней. Через сутки после последней выпойки феррогумата от крыс контрольной и опытных групп ($n = 5$) отбирали в две пробирки пробы крови для оценки морфологических и биохимических показателей. Затем животных умертвляли и проводили патологоанатомическое вскрытие с целью макроскопического исследования внутренних органов.

Пробы крови исследовали с помощью гематологического (Orphee mythic 18, Швейцария) и биохимического (DIALAB Autolysers ISE, Италия) анализаторов.

Результаты исследований и их обсуждение. Для получения гуминового препарата – основы феррогуматсодержащего комплекса – необходимо было подобрать торфяное сырье и оценить его физико-химические свойства и содержание гуминовых веществ, а в их составе – гуминовых кислот и фульвокислот.

Содержание гуминовых веществ в торфе находится в прямой зависимости от степени его разложения. При получении гуминовых препаратов минеральная составляющая торфа является балластом и снижает выход гуминовых веществ, что необходимо учитывать при отборе проб. В этой связи при подборе торфа, пригодного для получения гуминового препарата, использовали образцы с высоким уровнем гумификации и невысоким содержанием золы.

Отобранные образцы представлены верховым и низинным торфом с высокой степенью разложения и, судя по геоботанической характеристике, они могут быть пригодны для получения гуминовой основы железосодержащего препарата.

Исследованы физико-химические свойства образцов торфа.

Основными физико-химическими показателями, определяющими пригодность торфа для многих направлений использования, являются содержание органических веществ, влажность, зольность, кислотность, от которых зависит его сорбционная способность и другие важные показатели.

В связи с тем, что для получения феррогуматсодержащего комплекса предполагалось использовать гуминовый препарат, необходимо было оценить образцы торфа с точки зрения содержания гуминовых веществ, а в их составе – гуминовых кислот и фульвокислот. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2.

Установлено, что анализируемые образцы торфа имели показатели влажности, характерные для фрезерного торфа 45,5–54,9 %. Показатели зольности в образцах низинных и верхового торфа сильно отличались. Зольность образца № 1 низинного торфа составляла 9,3 %, образца № 2 – 8,5 %. Образец № 3 верхового сфагнового торфа характеризовался низкой зольностью – 2,2 %, что предпочтительнее для получения гуминового препарата. Определение активной кислотности (pH) исследуемых образцов позволило установить, что пробы низинного торфа (образцы № 1 и № 2) обладали близкими значениями – pH 5,9–6,4, а образец № 3, сложенный преимущественно сфагновыми мхами, имел более низкое значение – pH 4,1.

Таблица 2. Характеристика образцов торфа**Table 2. Characterization of peat samples**

Номер образца	Массовая доля, %						pH
	в торфе			от органического вещества			
	Влага	Зола	Органическое вещество	Гуминовые вещества	Гуминовые кислоты	Фульво- кислоты	
1	54,9	9,3	35,8	41,6	29,5	12,1	5,9
2	45,5	8,5	46,0	45,4	31,6	13,8	6,4
3	52,6	2,2	45,2	36,2	24,9	11,3	4,1

Исследованные образцы торфа отличаются по содержанию гуминовых веществ и их компонентов. Более высоким содержанием соединений гуминовой природы характеризуются образцы низинного торфа № 1 и № 2, включающие в состав органической массы 41,6 и 45,4 % гуминовых веществ, а их наиболее активная часть – гуминовые кислоты – присутствуют в количестве 29,5–31,6 % в расчете на органическую массу, фульвокислоты – 12,1–13,8 %.

Результаты исследований верхового торфа показали, что содержание гуминовых веществ в нем немного меньше и составляет 36,2 %, при этом на долю гуминовых кислот в его органической массе приходится 24,9 %, фульвокислот – 11,3 %.

Таким образом, все подобранные образцы пригодны для получения гуминового препарата, так как содержат значительные количества гуминовых веществ.

Сорбционную способность гуминовых веществ характеризует количество функциональных групп, в первую очередь карбоксильных и гидроксильных. Содержание функциональных групп в гуминовых кислотах исследуемых торфов представлено в табл. 3.

Таблица 3. Содержание функциональных групп в гуминовых кислотах исследуемых торфов**Table 3. Content of functional groups in humic acids of the studied peats**

Образец гуминовых кислот	Функциональные группы, мг-экв/г		
	сумма	–COOH	–ОН _{фен}
1	5,6	2,6	3,0
2	5,9	2,5	3,4
3	6,0	2,8	3,2

Наиболее высоким суммарным содержанием функциональных групп характеризуется верховой сфагновый торф – 6,0 мг-экв/г. Для низинных торфов этот показатель составляет 5,6–5,9 мг-экв/г. При этом преобладают фенольные гидроксилы, содержание которых в низинных торфах достигает 3,0–3,4 мг-экв/г, а в сфагновом торфе – 3,2 мг-экв/г.

Таким образом, установлено, что для получения феррогумата могут быть использованы все исследованные образцы, но для дальнейшей работы был выбран верховой сфагновый торф, характеризующийся малой зольностью, достаточно высоким содержанием гуминовых веществ и большим количеством функциональных групп.

Для получения гуминового препарата – основы феррогумата – необходимо было не просто экстрагировать гуминовые кислоты из торфа, но и провести их модификацию с целью увеличения сорбционной емкости.

Многочисленными исследованиями показано, что деструкция гуминовых кислот под влиянием физических и химических воздействий приводит к уменьшению их молекулярной массы, разблокировке важнейших функциональных групп, увеличению их количества, значительному повышению реакционной способности и биологической активности этих соединений.

Эффективным методом деструкции гумуссодержащего сырья является окисление в щелочной среде. Поэтому для получения феррогуматсодержащего комплекса было предложено использовать гуминовый препарат, полученный из торфа высокой степени разложения методом окисления торфа в щелочной среде с целью увеличения в составе препарата кислородсодержащих функциональных групп.

Изучена эффективность окисления торфа как способа получения препарата с максимальным выходом гуминовых веществ, а также влияние условий его получения на сорбционную емкость гуминовых кислот.

В качестве щелочного агента для извлечения гуминовых веществ был выбран гидроксид аммония, хотя его применение для этих целей менее эффективно в сравнении с гидроксидами натрия и калия. Однако применение гидроксида аммония позволяет получить препарат с нейтральной реакцией

среды (после удаления аммиака из раствора испарением) и использовать его для выпойки животных либо как добавку к корму. Расход гидроксида аммония во всех опытах составлял 25 % от сухого вещества торфа.

На лабораторной установке отработаны параметры процесса получения гуминового препарата методом окислительной деструкции пероксидом водорода при температуре 100–105 °С, расход окислителя варьировался от 5 до 15 % от органической массы торфа, продолжительность процесса составляла 2, 3 и 4 ч. Гидромодуль во всех опытах был постоянным – 1 : 15. Критерием эффективности процесса служила массовая доля гуминовых веществ в растворе. В табл. 4 показано влияние условий проведения окислительной деструкции торфа на содержание гуминовых веществ в растворе препарата.

Таблица 4. Влияние условий проведения окислительной деструкции торфа на содержание гуминовых веществ в растворе препарата

Table 4. Effect of process conditions on the content of humic substances in the preparation solution

Расход H ₂ O ₂ , % на сухое вещество торфа	Продолжительность, ч	Массовая доля гуминовых веществ, % в растворе
5	2	2,1
	3	3,2
	4	3,5
10	2	2,0
	3	3,5
	4	3,8
15	2	2,2
	3	3,7
	4	4,0

Наибольший выход гуминовых веществ получен при продолжительности процесса 3–4 ч и расходе пероксида водорода 10–15 % на сухое вещество торфа.

Для определения оптимальных условий получения основы феррогумата определена сорбционная емкость выделенных гуминовых кислот, полученных в наиболее перспективных вариантах, которую оценивали по содержанию функциональных групп: карбоксильных и фенольных гидроксидов (табл. 5).

Таблица 5. Содержание функциональных групп в гуминовых кислотах препарата, полученного в разных условиях

Table 5. Content of functional groups in humic acids of the preparation obtained under different conditions

Образец гуминовых кислот		Функциональные группы, мг-экв/г		
Время, ч	Расход H ₂ O ₂ , %	Сумма	–COOH	–ОН _{фен}
3	10	6,7	3,3	3,4
4	10	6,9	3,4	3,5
3	15	7,1	3,6	3,5
4	15	7,2	3,7	3,5

Анализ содержания функциональных групп в исследуемых образцах гуминовых кислот позволил выявить существенное влияние способа получения гуминового препарата на их распределение. В окисленных гуминовых кислотах существенно возросло количество карбоксильных групп и фенольных гидроксидов. Их суммарное содержание составило 6,7–7,2 мг-экв/г, тогда как в гуминовых кислотах исходного торфа этот показатель находился на уровне 6,0 мг-экв/г. При этом с увеличением продолжительности процесса и расхода окислителя возросло количество карбоксильных групп с 3,3 до 3,7 мг-экв/г, а содержание фенольных гидроксидов оставалось практически на одном уровне.

Таким образом, гуминовый препарат может быть получен окислением сфагнового торфа пероксидом водорода с расходом 10–15 % на сухое вещество торфа, в течение 3–4 ч, при температуре 100–105 °С в среде гидроксида аммония с расходом 25 % на сухое вещество торфа.

При этих условиях наработан образец гуминового препарата – основы железосодержащего комплекса. Выполнена его физико-химическая характеристика, которая представлена в табл. 6.

Таблица 6. Физико-химическая характеристика гуминового препарата**Table 6. Physico-chemical characterization of humic preparation**

Массовая доля веществ, %				Плотность, г/см ³	pH	Содержание функциональных групп, мг-экв/г		
сухих	органических	минеральных	гуминовых			сумма	–COOH	–ОН _{фен}
3,90	3,75	0,15	3,00	1,025	10,2	7,1	3,6	3,5

Лабораторный образец гуминового препарата – это жидкость темно-коричневого цвета с запахом аммиака, плотностью раствора 1,025 г/см³ и щелочной реакцией среды – pH 10,2. Массовая доля сухих веществ в растворе составляет 39 г/л, при этом более чем на 96 % они представлены органическими веществами, минеральная часть незначительна (0,15 %) в связи с малой зольностью торфа. Органические вещества препарата, в свою очередь, на 80 % состоят из гуминовых веществ. Гуминовый препарат отличается высоким содержанием функциональных групп, суммарное содержание которых составляет 7,1 мг-экв/г.

На основе жидкого оксидата получен железосодержащий комплексный гуминовый препарат. Предварительно, перед введением соединений железа, из гуминового препарата удаляли аммиак методом испарения. При этом его объем уменьшился вдвое, а концентрация органических и гуминовых веществ возросла также в 2 раза.

В качестве железосодержащего соединения использовали свежеприготовленный гидроксид железа (III), полученный при взаимодействии хлорида железа (III) с гидроксидом натрия. В результате реакции выпадал красно-коричневый осадок гидроксида железа, а в растворе оставался хлорид натрия. Осадок отделяли центрифугированием и использовали для введения в гуминовый препарат. Гидроксид железа получали в количестве, необходимом для создания концентрации железа в гуминовом препарате 50–60 мг/мл.

Для получения феррогумата в гуминовый препарат вводили гидроксид железа (III), перемешивали в течение 1 ч и оставляли на 2 сут.

Изучены физико-химические свойства комплексного препарата, в том числе содержание в нем железа, табл. 7.

Таблица 7. Физико-химическая характеристика феррогуматсодержащего препарата**Table 7. Physico-chemical characterization of ferrohumate-containing preparation**

Цвет	Массовая доля веществ, %				Массовая доля железа, мг/мл	Плотность, г/см ³	pH
	сухих	органических	минеральных	гуминовых			
Красно-коричневый	13,83	7,52	6,31	6,00	60,25	1,24	7,55

Препарат представлял собой жидкость красно-коричневого цвета с массовой долей сухих веществ 13,83 % и органических веществ 7,52 %. Доля минеральных веществ в комплексном препарате увеличилась до 6,31 % в связи с введением соединений железа. Плотность препарата составила 1,24 г/см³, pH – 7,55. Массовая доля железа в растворе – 60,25 мг/мл. Препарат хорошо растворим в воде в любых соотношениях и не образует осадка при разбавлении.

Первичные испытания феррогумата выполнены в РУП «Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелеского» на лабораторных животных.

Предварительно в условиях вивария на белых беспородных мышах массой 18–21 г проведены токсикологические исследования феррогумата – определение острой токсичности и класса опасности. Установлено, что среднесмертельная доза (ЛД₅₀) препарата при внутрижелудочном введении белым мышам составляет 146 666,7 мг/кг массы тела животного. В соответствии с этим показателем, согласно ГОСТ 12.1.007–76 (ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности), феррогумат относится к IV классу опасности (вещества малоопасные).

Оценка профилактической и лечебной эффективности феррогуматсодержащего препарата при экспериментальной железодефицитной анемии проведена на 20 самках белых крыс живой массой 175–240 г. Для моделирования экспериментальной железодефицитной анемии животным 2-й и 3-й групп подкожно вводили 2%-ный водный раствор солянокислого фенолгидразина, животные 1-й группы служили контролем. Результаты морфологического исследования крови контрольных и опытных крыс приведены в табл. 8.

Таблица 8. Результаты морфологического исследования крови контрольных и опытных крыс через 6 дней и в конце опыта**Table 8. Results of morphological study of blood of control and experimental rats after 6 days and at the end of the experiment**

Показатель	Фон	Группа					
		1-я		2-я		3-я	
		через 6 дней	в конце опыта	через 6 дней	в конце опыта	через 6 дней	в конце опыта
Содержание лейкоцитов (WBC), $\cdot 10^9/\text{л}$	$5,57 \pm 0,57$	$5,40 \pm 0,43$	$7,05 \pm 2,24$	$5,38 \pm 0,62$	$7,86 \pm 3,07$	$5,34 \pm 0,59$	$5,70 \pm 1,70$
Содержание эритроцитов (RBC), $\cdot 10^{12}/\text{л}$	$6,60 \pm 0,42$	$6,90 \pm 0,69$	$6,71 \pm 0,83$	$7,70 \pm 0,96$	$6,89 \pm 1,17$	$7,92 \pm 0,66$	$7,74 \pm 0,26$
Гемоглобин (HGB), г/л	$162,02 \pm 6,87$	$160,40 \pm 11,91$	$167,05 \pm 8,37$	$170,40 \pm 14,96$	$142,60 \pm 7,65$	$175,00 \pm 13,06$	$155,40 \pm 4,59$
Гематокрит (HCT), л/л	$0,394 \pm 0,02$	$0,382 \pm 0,04$	$0,592 \pm 0,03$	$0,404 \pm 0,05$	$0,481 \pm 0,05$	$0,431 \pm 0,03$	$0,515 \pm 0,02$
Средний объем эритроцита (MCV), фл	$51,85 \pm 0,41$	$52,38 \pm 0,02$	$50,73 \pm 1,05$	$52,48 \pm 0,15$	$62,28 \pm 1,56$	$52,56 \pm 0,24$	$58,44 \pm 1,27$
Среднее содержание гемоглобина в эритроците (MCH), пг	$15,58 \pm 0,35$	$15,30 \pm 0,24$	$15,18 \pm 0,44$	$15,78 \pm 0,31$	$14,95 \pm 0,49$	$15,84 \pm 0,17$	$15,12 \pm 0,34$
Средняя концентрация гемоглобина в эритроците (MCHC), г/л	$335,85 \pm 13,08$	$325,40 \pm 7,86$	$313,60 \pm 4,19$	$334,80 \pm 6,20$	$271,40 \pm 2,49$	$346,80 \pm 3,45$	$299,10 \pm 2,28$
Ширина распределения эритроцитов (RDW), %	$14,48 \pm 0,41$	$14,60 \pm 0,17$	$14,65 \pm 0,80$	$14,46 \pm 0,15$	$15,43 \pm 0,78$	$14,32 \pm 0,27$	$15,06 \pm 0,99$
Содержание тромбоцитов (PLT), $\cdot 10^9/\text{л}$	$319,67 \pm 20,29$	$302,40 \pm 30,65$	$312,00 \pm 15,34$	$237,80 \pm 35,50$	$362,40 \pm 25,57$	$230,40 \pm 38,35$	$322,20 \pm 16,58$
Средний объем тромбоцита (MPV), фл.	$6,33 \pm 0,16$	$6,98 \pm 0,14$	$6,48 \pm 0,31$	$6,78 \pm 0,17$	$5,88 \pm 0,42$	$6,99 \pm 0,19$	$6,82 \pm 0,58$
Тромбокрит (PCT), %	$0,202 \pm 0,03$	$0,211 \pm 0,04$	$0,218 \pm 0,04$	$0,219 \pm 0,07$	$0,261 \pm 0,03$	$0,223 \pm 0,05$	$0,227 \pm 0,04$
Ширина распределения тромбоцитов (PDW), %	$14,12 \pm 1,11$	$15,08 \pm 0,70$	$14,98 \pm 1,11$	$15,44 \pm 1,25$	$15,19 \pm 1,30$	$15,32 \pm 1,33$	$15,58 \pm 0,77$

Установлено, что на 6-й день опыта в крови крыс 2-й и 3-й групп, по сравнению с контрольными животными, повысилось содержание эритроцитов (RBC) на 11,6 и 14,8 % соответственно, а уровень гемоглобина (HGB) – на 6,2 и 9,1 %, что свидетельствует об активизации кроветворной системы за счет дополнительного поступления железа с феррогуматсодержащим препаратом. На это указывают также уровень гематокрита (HCT), эритроцитарные индексы (MCV, MCH, MCHC, RDW), а также количество тромбоцитов (PLT) и их индексы (MPV, PCT, PDW). Существенных межгрупповых различий в содержании лейкоцитов в этот период опыта не выявлено.

К концу опыта у крыс всех групп количество эритроцитов снизилось по сравнению с предыдущим периодом, при этом наиболее значимые изменения (на 11,5 %) отмечены у животных 2-й группы. Тем не менее значение данного показателя ($6,89 \pm 1,17 \cdot 10^{12}/л$) было даже несколько выше (на 2,7 %), чем у крыс контрольной группы. На фоне 10-дневного применения феррогуматсодержащего препарата у животных 3-й группы содержание эритроцитов практически не отличалось от предыдущего периода исследования и было выше, чем у крыс 1-й и 2-й групп на 15,3 и 12,3 % соответственно. Уровень гемоглобина у животных 2-й и 3-й опытных групп снизился более существенно по сравнению с крысами контрольной группы (на 14,6 и 7,0 %) и 6-м днем опыта (на 16,3 и 11,2 % соответственно). Менее значимое снижение содержания эритроцитов по сравнению с гемоглобином в периферической крови крыс опытных групп с экспериментальной железодефицитной анемией, по-видимому, связано с увеличением доли менее зрелых клеток. В пользу такого предположения указывают показатель среднего объема эритроцитов (MCV) и ширина их распределения (RDW). Известно, что для железодефицитной анемии характерен микроцитоз, но в данном случае этот эритроцитарный индекс в большей степени изменился под влиянием фенилгидразина.

Параметры MCH, MCHC и RDW также указывают на анемичные состояния опытных крыс и нарушение в их организме процессов образования эритроцитов и гемоглобина.

Самое высокое количество тромбоцитов и низкий уровень гемоглобина у крыс 2-й группы может также указывать на железодефицитную анемию. У животных, которым феррогуматсодержащий препарат выпаивали в течение 10 дней (3-я группа), такой дисбаланс выражен менее, что указывает на лучшее обеспечение железом и усиление процесса кроветворения.

Данные биохимического исследования крови контрольных и опытных крыс приведены в табл. 9.

Таблица 9. Биохимические показатели крови крыс в конце опыта

Table 9. Biochemical parameters of blood of rats at the end of the experiment

Показатель	Группа		
	1-я	2-я	3-я
Общий белок, г/л	77,52 ± 1,98	75,38 ± 2,38	77,78 ± 2,05
Альбумин, г/л	46,92 ± 0,88	45,60 ± 2,41	48,16 ± 1,13
АлТ, ЕД/л	52,18 ± 4,61	52,34 ± 4,23	49,36 ± 5,01
АсТ, ЕД/л	146,80 ± 14,42	181,40 ± 15,94	144,20 ± 4,56
ЩФ, ЕД/л	227,60 ± 19,24	222,60 ± 25,13	199,60 ± 19,04
ГГТП, ЕД/л	1,72 ± 0,46	2,49 ± 0,41	2,43 ± 0,80
Амилаза, ЕД/л	903,00 ± 51,27	830,00 ± 62,51	825,40 ± 59,23
Общий билирубин, мкмоль/л	11,35 ± 2,23	13,66 ± 1,83	11,78 ± 2,26
Прямой билирубин, мкмоль/л	2,78 ± 0,47	3,30 ± 1,39	2,79 ± 0,37
Холестерин, ммоль/л	2,20 ± 0,22	1,79 ± 0,19	2,02 ± 0,15
Триглицериды, ммоль/л	1,15 ± 0,14	1,26 ± 0,20	1,39 ± 0,44
Глюкоза, ммоль/л	10,94 ± 0,79	7,91 ± 0,32	11,14 ± 0,65
Мочевина, ммоль/л	7,90 ± 0,65	8,69 ± 0,39	6,75 ± 0,26
Креатинин, мкмоль/л	66,16 ± 4,14	55,68 ± 4,38	58,28 ± 3,53
Мочевая кислота, мкмоль/л	154,86 ± 26,93	161,00 ± 27,30	166,40 ± 23,97
Кальций, ммоль/л	2,59 ± 0,05	2,50 ± 0,02	2,50 ± 0,03
Фосфор, ммоль/л	2,29 ± 0,13	2,33 ± 0,12	2,30 ± 0,09
Магний, ммоль/л	1,23 ± 0,05	1,26 ± 0,14	1,16 ± 0,10
Хлор, ммоль/л	108,20 ± 1,24	107,40 ± 0,76	106,00 ± 1,87
Калий, ммоль/л	5,53 ± 0,22	5,82 ± 0,20	5,60 ± 0,21
Натрий, ммоль/л	157,00 ± 1,37	156,00 ± 0,87	157,60 ± 0,91
Медь, мкг/дл	191,00 ± 22,89	185,60 ± 20,65	173,20 ± 13,67
Железо, мкмоль/л	69,24 ± 5,37	61,17 ± 6,12	76,06 ± 9,12
Цинк, мкг/дл	168,00 ± 6,07	175,20 ± 9,98	171,20 ± 11,67

Наибольший интерес в биохимическом анализе крови вызывают показатели, характеризующие функцию печени (белок и белковые фракции, аминотрансферазы, гаммаглутаминтранспептидаза, щелочная фосфатаза, билирубин) и обмен железа. Как видно из данных табл. 9, в сыворотке крови крыс 2-й опытной группы несколько снижено содержание общего белка за счет альбумина, вырабатываемого клетками печени. Он не является высокочувствительным показателем, но уровень альбумина зависит от функционального состояния печени.

При поражении печени лекарственными препаратами может отмечаться повышение активности щелочной фосфатазы, но у животных опытных групп данный показатель даже несколько ниже, чем у крыс контрольной группы. Об отсутствии серьезного поражения гепатоцитов свидетельствуют значения АлТ и АсТ. При острых процессах печени они могут иногда повышаться в несколько раз, причем в таких случаях чаще повышается АлТ. Достаточно информативным и высокочувствительным показателем, помогающим выявить заболевание печени на начальном этапе, является гаммаглутаминтранспептидаза (ГГТП). Видно, что активность данного фермента выше у крыс опытных групп, что указывает на гепатотоксическое действие фенилгидразина, использованного для моделирования экспериментальной железодефицитной анемии.

Отмечено повышение сывороточного железа у животных 3-й группы (разница относительно крыс 1-й и 2-й групп составляла 9,8 и 24,3 % соответственно).

Определено влияние феррогуматсодержащего препарата на прирост массы тела животных и массы органов – печени и селезенки (табл. 10).

Таблица 10. Динамика живой массы контрольных и опытных крыс

Table 10. Dynamics of live weight of control and experimental rats

Группа	Масса животных		Прирост массы, %	Прирост массы органа			
	в начале опыта	в конце опыта		селезенка		печень	
				г	%	г	%
1-я	217,43 ± 12,05	239,94 ± 14,57	9,25	1,31 ± 0,23	0,53 ± 0,06	7,64 ± 0,37	3,99 ± 0,23
2-я	209,50 ± 15,10	237,81 ± 17,42	11,74	2,25 ± 0,33	0,97 ± 0,11	10,80 ± 1,14	4,62 ± 0,34
3-я	216,86 ± 7,18	243,94 ± 9,42	11,03	2,29 ± 0,17	0,94 ± 0,05	10,13 ± 0,41	4,19 ± 0,06

Установлено, что за период опыта прирост массы тела у крыс контрольной группы составил 9,25 %. У опытных животных 2-й и 3-й групп данный показатель был выше на 2,49 и 1,78 % соответственно, что, по-видимому, связано с увеличением массы их внутренних органов.

Результаты определения массы печени и селезенки крыс контрольной и опытных групп показали, что на фоне экспериментальной фенилгидразиновой железодефицитной анемии у животных опытных групп отмечено существенное увеличение абсолютной и относительной массы печени, и особенно селезенки. Примечательно, что у крыс 3-й группы (получавших железо более продолжительный период) относительная масса указанных органов была меньше, чем у животных 2-й группы.

Выводы.

1. Показана возможность создания феррогуматсодержащего препарата для профилактики анемии у сельскохозяйственных животных путем введения ионов железа в состав гуминового препарата в дозе, не превышающей его обменную емкость.

2. Разработан способ получения феррогуматсодержащего комплекса, который заключается в окислении сфагнового торфа пероксидом водорода с расходом 10–15 % на сухое вещество торфа, в течение 3 ч, при температуре 100–105 °С, в среде гидроксида аммония с расходом 25 % на сухое вещество торфа и введением в состав жидкого гуминового препарата свежеприготовленного гидроксида железа в количестве, необходимом для создания концентрации железа 50–60 мг/мл.

3. Препарат представляет собой жидкость красно-коричневого цвета с содержанием сухих веществ 14,0 %, органических веществ – 7,65 %. Доля минеральных веществ составляет 6,35 %. Исследован химический состав основы феррогуматсодержащего препарата оксида торфа и феррогумата.

4. Токсикологические исследования феррогумата показали, что его среднесмертельная доза (ЛД₅₀) при внутрижелудочном введении белым мышам составляет 146 666,7 мг/кг массы тела животного и в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 по степени воздействия на организм он относится к IV классу опасности (вещества малоопасные).

5. Первичная оценка лечебной эффективности феррогуматсодержащего препарата при экспериментальной железодефицитной анемии на лабораторных животных показала, что он содержит усвояемое организмом животных железо, которое способно связываться с белками крови и включаться в процессы кроветворения. Оральное введение белым крысам феррогумата в течение 5 дней

из расчета 0,7 мг железа на голову в сутки активизировало кроветворную систему животных. Выпаивание белым крысам феррогумата в течение 10 дней (два курса по 5 дней с интервалом 2 сут) из расчета 0,7 мг железа на голову в сутки увеличивало запасные фонды железа и, судя по результатам лабораторного исследования крови, нивелировало проявление экспериментальной железодефицитной анемии.

Список использованных источников

1. Кучинский, М. П. Биоэлементы – фактор здоровья и продуктивности животных / М. П. Кучинский. – Минск : Бизнесофсет, 2007. – 371 с.
2. Кучинский, М. П. Ферровит – новое средство профилактики железодефицитной анемии поросят / М. П. Кучинский // Современные вопросы патологии сельскохозяйственных животных : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 23–24 окт., Минск, 2003. – С. 176–178.
3. Кучинский, М. П. Отработка оптимальной дозы и изучение профилактической эффективности тетраминерала при железодефицитной анемии поросят / М. П. Кучинский // Ветеринарная медицина Беларуси. – 2007. – № 1. – С. 5–11.
4. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 328 с.
5. Биологически активные гуминовые препараты и различные аспекты их физиологического действия / Г. В. Наумова [и др.] // Природопользование. – 1996. – Вып. 1. – С. 99–103.
6. Сысков, К. И. Определение конститутивных групп в гуминовых кислотах / К. И. Сысков, Т. А. Кухаренко // Заводская лаборатория. – 1957. – № 1. – С. 25–27.
7. Методические указания по токсикологической оценке химических веществ и фармакологических препаратов, применяемых в ветеринарии. – Минск, 2007. – 24 с.
8. Беленький, М. Л. Элементы количественной оценки фармакологического эффекта / М. Л. Беленький — Л. : Медгиз, 1963. – 168 с.
9. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности : ГОСТ 12.1.007–76. – Введ. 01.01.77. – М. : Стандартиформ, 2007. – 6 с.

References

1. Kuchinskiy M. P. *Bioelementy – faktor zdorovya i produktivnostiivotnykh: monografiya* [Bioelements – a factor of health and productivity of animals: monograph]. Minsk, Biznesofset Publ., 2007, 371 p. (in Russian)
2. Kuchinskiy M. P. *Ferrovit – novoe sredstvo profilaktiki jelezodefitsitnoy anemii porosyat* [Ferrovit – a new means of prophylaxis of iron deficiency anemia of piglets]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Sovremennyye voprosy patologii sel'skoxozyastvennykh zivotnykh"* [Proc. of the Int. sci. and pract. conf. "Modern issues of pathology of agricultural animals"], October 23–24, 2003, Minsk, pp.176–178. (in Russian)
3. Kuchinskiy M. P. *Otrabotka optimalnoy dozy i izuchenie profilakticheskoy effektivnosti tetraminerala pri jelezodefitsitnoy anemii porosyat* [Development of the optimal dose and study of the prophylactic effectiveness of tetramineral at iron deficiency anemia of piglets]. *Veterinarnaya medicina Belarusi = Veterinary Medicine of Belarus*, 2007, no. 1, pp. 5–11. (in Russian)
4. Tomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and products of its processing]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2009, 328 p. (in Russian)
5. Naumova G. V., Jmakova N. A., Ovchinnikova T. F., Konoplya E. F., Makarova N. L., Ermakova S. S. *Biologicheski aktivnyie guminovyye preparaty i razlichnyie aspekty ih fiziologicheskogo deystviya* [Biologically active humic preparations and various aspects of their physiological action]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 1996, issue 1, pp. 99–103. (in Russian)
6. Syiskov K. I., Kuharenko T. A. *Opredelenie konstitutivnykh grupp v guminovykh kislotah* [Determination of constitutive groups in humic acids]. *Zavodskaya laboratoriya = Factory laboratory*, 1957, no. 1, pp. 25–27. (in Russian)
7. *Metodicheskie ukazaniya po toksikologicheskoy otsenke himicheskikh veschestv i farmakologicheskikh preparatov, primenyaemykh v veterinarii* [Methodical instructions on toxicological evaluation of chemical substances and pharmacological preparations used in veterinary medicine]. Minsk, 2007, 24 p. (in Russian)
8. Belenkiy M. L. *Elementy kolichestvennoy otsenki farmakologicheskogo efekta*. [Elements of quantitative assessment of pharmacological effect]. Leningrad, Medgiz Publ., 1963, 168 p. (in Russian)
9. *GOST 12.1.007–76. Vrednyie veschestva. Klassifikatsiya i obschie trebovaniya bezopasnosti* [State Standart 12.1.007–76. Harmful substances. Classification and general safety requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 6 p. (in Russian)

Информация об авторах

Жмакова Надежда Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhmakova@mail.ru

Макарова Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

Кучинский Михаил Павлович – доктор ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник, РУП «Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского» (ул. Брикета, 28, 220063, г. Минск, Беларусь). E-mail: kmpvet@yandex.ru

Кучинская Галина Михайловна – научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, РУП «Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского» (ул. Брикета, 28, 220063, г. Минск, Беларусь). E-mail: kmpvet@yandex.ru

Information about the authors

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Natalyia L. Makarova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

Mikhail P. Kuchinsky – D. Sc. (Veterinary), Professor, Chief Researcher, RUE "S. N. Vyshellessky Institute of Experimental Veterinary Science" (28, Briketa Str., 220063, Minsk, Belarus). E-mail: kmpvet@yandex.ru

Galina M. Kuchinskaya – Researcher, Acting Head of the department, RUE "S. N. Vyshellessky Institute of Experimental Veterinary Science", (28, Briketa Str., 220063, Minsk, Belarus). E-mail: kmpvet@yandex.ru

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ ГРУППОВОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОЙ МАССЫ ГРИБНЫХ СУБСТРАТОВ ПРИ ФЕРМЕНТАЦИИ

М. А. Шелоник, Г. Г. Янута

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Объемы промышленного производства грибов, в отличие от многих сельскохозяйственных направлений, с каждым годом растут благодаря возможности круглогодично получать готовую продукцию с высоким содержанием полноценного пищевого белка и независимо от погодных условий. Однако главным сдерживающим фактором его развития в Республике Беларусь является нехватка отечественного субстрата. Для выращивания грибов субстрат должен содержать полный набор макро- и микроэлементов, необходимых для их роста и развития. Сбалансированный и правильно подобранный питательный субстрат поможет обеспечить высокий и стабильный урожай на протяжении всего процесса производства. С этой целью был проведен групповой анализ питательных субстратов на стадии ферментации в процессе выращивания грибов. Показано, что в процессе подготовки (созревания) субстрата происходят изменения в его групповом составе, в частности наблюдается увеличение доли гуминовых веществ за счет снижения содержания лигнина, целлюлозы и легкогидролизуемых веществ.

Ключевые слова: грибоводство; ферментация; микроорганизмы; грибной субстрат; групповой состав.

Для цитирования. Шелоник М. А., Янута Г. Г. Динамика изменений группового состава органической массы грибных субстратов при ферментации // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 176–184.

DYNAMICS OF CHANGES IN THE GROUP COMPOSITION OF ORGANIC MASS OF MUSHROOM SUBSTRATES DURING FERMENTATION

M. A. Shelonik, G. G. Yanuta

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

Abstract. The volumes of mushrooms industrial production, unlike many agricultural areas, are growing every year due to the ability to obtain finished products with high content of complete food protein all year round and independence from weather conditions. However, the main limiting factor for its development in the Republic of Belarus is the lack of domestic substrate. To grow mushrooms, the substrate should contain full set of macro- and microelements necessary for their growth and development. Balanced and properly selected nutrient substrate will help ensure high and stable yield throughout the entire production process. For this purpose, a group analysis of nutrient substrates was carried out at the fermentation stage in the mushroom growing process. It has been shown that during the preparation (ripening) of the substrate, changes occur in its group composition, in particular, an increase in the proportion of humic substances is observed due to a decrease in the content of lignin, cellulose and easily hydrolyzed substances.

Keywords: mushroom growing; fermentation; microorganisms; mushroom substrate; group analysis method.

For citation. Shelonik M. A., Yanuta G. G. Dynamics of changes in the group composition of organic mass of mushroom substrates during fermentation. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 176–184.

Введение. Сегодня грибоводство зарекомендовало себя как перспективное направление, благодаря не только получению свежих продуктов, богатых белком, незаменимыми аминокислотами, витаминами, но и невосприимчивости к погодным условиям в сравнении с другими отраслями сельского хозяйства. Рост спроса на выращенные грибы и продукцию на их основе у населения обусловливается повышением осведомленности потребителей о пользе грибов для здоровья и меняющимися пищевыми предпочтениями в сторону веганских продуктов. До 80 % производства грибов сосредоточено в Китае, наибольший объем которых занимают экзотические грибы (шиитаке, мацутаке, эноки, рейша и др.), а не известные всему миру белые шампиньоны. В Беларуси и России, наоборот, они вместе с вешенками считаются наиболее востребованными продуктами питания. По данным Белстата [1], производство грибов за последние 5 лет увеличилось в 10 раз, и данный показатель продолжит расти с каждым годом на 10–15 %, с чем связывают политику стран в сторону импортозамещения. Эффек-

тивность производства грибной продукции повышается в связи с внедрением высокотехнологичных методов культивирования: поддержания микроклимата на стабильном уровне, автоматизации систем увлажнения, формирования субстрата и покровной почвы и т. д. [2]. Одновременно с этим обманчивая простота технического процесса выращивания не отменяет его сложности в попытках создания оптимальных условий для скорейшего получения плодовых тел. Влияние температуры на скорость роста и качество плодовых тел показано в литературе [2–4]. При этом грибы различных семейств, а часто и различных линий, весьма чувствительны к температурным диапазонам и в ряде случаев реагируют по-разному на данный фактор. Кроме температуры, для каждого вида грибов есть разные условия для роста и развития.

В качестве наглядного примера следует рассмотреть вешенку и шампиньон. Оба представителя относятся к одному семейству Агариковые, но к разным экологическим группам. Вешенка устричная (*Pleurotus ostreatus*) относится к группе ксилотрофных (или древоразрушающих) грибов, развивающихся на древесине. Для данной группы грибов в качестве субстратов используются побочные лигносодержащие продукты сельского хозяйства, что снижает затраты на производство для них субстрата [5–6]. Шампиньон двуспоровый (*Agaricus bisporus*) относится к группе гумусовых сапротрофов, грибница которых развивается в почве так же, как и микоризных грибов, но, в отличие от них, не образует симбиоза с корнями высших растений. Несмотря на некоторые сходства с растениями, грибы не способны размножаться в «неподготовленном» субстрате, ввиду того что его подготовку осуществляют обитающие там микроорганизмы. Именно подготовка субстрата, а точнее его ферментация с целью создания оптимальных условий для развития микоризы, и является ключевым моментом при создании эффективных субстратов для выращивания грибов, в частности шампиньонов. Однако процесс выращивания и получения свежих шампиньонов осложняется такими этапами в производстве, как приготовление субстрата и покровной почвы. Для этого первым и самым главным этапом в выращивании грибов является приготовление питательного субстрата. Качественный и сбалансированный субстрат служит залогом высокого урожая. Для достижения этой цели грибной субстрат должен обладать следующими критериями: питательностью, гомогенностью и селективностью. В грибоводстве выделяют три типа субстрата: натуральный, полусинтетический, синтетический [2–6]. В состав первых двух входит конский навоз, который менее распространен в Беларуси [7]. Последний тип (с преобладанием куриного помета) является наиболее предпочтительным вариантом, ввиду сильно развитой у нас птицеводческой отрасли. Несмотря на различные рецептуры приготовления, основными компонентами для получения субстрата являются солома злаковых культур (пшеница, рис, рапс и др.), навоз или птичий помет, вода, растительные либо минеральные добавки. Первым этапом при выращивании грибов является увлажнение соломы. Солома, являясь побочным продуктом сельского хозяйства, также выступает основным источником углерода для микроорганизмов [5–8]. Увлажнение служит двум целям: во-первых, помочь снизить количество патогенных микроорганизмов, способных конкурировать с выращенными грибами за ресурсы и пространство, в случае их неустранения; во-вторых, сделать солому более доступной для биодеструкции ее микроорганизмами [9]. Следующим этапом является перемешивание увлажненной соломы с навозом или куриным пометом, которые служат основными источниками азота. После этого происходит один из главных этапов «подготовки» субстрата – ферментация.

Цель работы – изучить динамику изменения в органической части субстрата в процессе его ферментации при различных температурных режимах и с различными компонентами для обоснования температурных режимов ферментации и конкретного состава исходных материалов.

Материалы и методы исследования. В исследовании был проанализирован состав отдельных компонентов, входящих в состав субстратов для выращивания грибов. Образцы были исследованы классическими, общепринятыми методами для определения основных качественных и количественных характеристик, таких как влажность, зольность, групповой состав, ботанический состав, степень разложения. Качество субстрата и его химический состав оценивали с помощью группового анализа органической части по методике Инсторфа [10]. Суть метода заключается в определении класса веществ, растворимых в определенных растворителях. Все вещества на основании данного метода условно делятся на следующие группы: битумы (Б), легкогидролизуемые и водорастворимые вещества (ЛГВ), редуцирующие вещества (РВ), гуминовые вещества (ГВ), трудногидролизуемые вещества (целлюлоза) (ТГВ), негидролизуемые вещества (лигнин) (НГВ). Приготовление субстратов осуществляли по методу Пешке.

Результаты и их обсуждение. Ферментация – это экзотермический процесс, в ходе которого происходит биодegradация исходных компонентов в процессе жизнедеятельности различных групп микроорганизмов. Основные цели ферментации: во-первых, подвергнуть материалы разложению, чтобы изменить состав содержащихся в них органических веществ и создать необходимые условия для роста и развития грибов; во-вторых, обогатить субстрат недостающими питательными веществами и устранить патогенные и конкурирующие организмы [11]. Температурный режим устанавливается в результате саморазогрева за счет деятельности микроорганизмов и является индикатором разви-

тия процесса ферментации. Условно ферментацию можно разделить на четыре температурные стадии: мезофильную (до 40 °C), термофильную (до 60 °C), остывания (до 40 °C) и созревания (до разницы не более 10 °C между средней температурой массы и температурой окружающей среды) [11–12]. В первую очередь температура играет роль ускорителя процесса ферментации субстрата, поскольку считается, что при повышении температуры в пределах от 10 до 50 °C на каждые 10 °C микробные процессы ускоряются в 2–3 раза [13]. Регулирование температуры также помогает селективно регулировать микробиоценоз в субстрате путем создания условий для развития микроорганизмов, индуцирующих соединения, необходимые для развития грибницы (например, бактерий и актиномицет). Для каждой из групп микроорганизмов характерен определенный диапазон температуры, который обеспечивает их оптимальный рост и развитие. Согласно литературным данным, в ферментации в зависимости температурного режима выделяют две группы организмов: термофилы (оптимум развития выше 45 °C) и мезофилы (оптимум развития 25–40 °C) [13–14]. Мониторинг изменения температуры на каждой стадии ферментации важно строго соблюдать. В тех случаях, когда происходит резкое повышение температуры (до 65–85 °C) на начальной стадии ферментации, как правило, будет наблюдаться снижение скорости биodeградации органического субстрата, поскольку такие температуры оказываются выше оптимальных для деятельности мезофильных микроорганизмов [14].

На производстве при приготовлении субстрата традиционно используют технологию с буртами. После смешивания соломы с навозом или куриным пометом формируются бурты. В сформированных буртах ферментация интенсивно происходит только в центре, поскольку на поверхности из-за подсыхания она идет слабее, а в самом низу бурта почти не идет, так как там создаются анаэробные условия для жизнедеятельности микроорганизмов [2–7]. Решением данной проблемы являются перебивки. Технология осуществляется следующим образом: материал из различных зон бурта разрыхляют, аэрируют, увлажняют, а затем снова формируют бурт таким образом, чтобы верхние и нижние слои бурта были в центре, а компост из наиболее благоприятной для ферментации средней зоны находился наверху. Новый бурт формируют на 10–20 см уже старого с целью улучшения режима аэрации [7].

Микроорганизмы в грибном субстрате используют углеродсодержащие компоненты как источники энергии для усвоения азотистых и других веществ, необходимых для создания собственной биомассы. Первую мезофильную стадию ферментации осуществляют мезофильные микроорганизмы, которые с повышением температуры будут замещаться термофилами. Большая часть мезофилов представлена представителями семейства *Enterobacteriales* (*Proteobacteria*), которые являются факультативными анаэробами, обитают в почве, желудочно-кишечном тракте людей и животных и активны на ранних стадиях ферментации [12]. Основная функция мезофилов – запуск процесса ферментации и начальное повышение температуры ферментативной смеси. Мезофильные микроорганизмы используют простые и доступные вещества (сахара, пектины), в то время как целлюлоза и гемицеллюлоза для них не доступны. С повышением температуры и истощением субстрата происходит высвобождение аммиака до тех пор, пока его концентрация не достигает токсического уровня для обитающей там микробиоты [13–14].

По мере постепенного повышения температуры в ферментируемом материале создаются благоприятные условия для развития термофильной микробиоты, которая на данном этапе становится доминирующей. В термофильной стадии ферментации более 80 % от общего числа бактерий составляют различные бациллы семейства *Bacillus* (*Firmicutes*) и наиболее часто обнаруживаются *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus circulans*, остальные 20 % представители рода *Thermus*, способные расти при температуре 65–82 °C и участвовать в разложении различных макромолекул [14]. Они используют образовавшийся аммиак, органические добавки и отмершие клетки мезофильных бактерий для синтеза микробиологического белка. Под воздействием целлюлолитических ферментов происходит разложение клетчатки до более простых соединений (гемицеллюлоз, декстринов, дисахаридов и т. д.). Образовавшиеся вещества после этого подвергаются окислению и распадаются до углекислого газа и воды с выделением тепла. Одновременно с этим азотсодержащие вещества подвергаются действию аммонифицирующих бактерий с образованием аммиака. Процесс аммонификации белка начинается с гидролиза протеолитических ферментов бактерий и актиномицетов. В результате образуются пептоны, аминокислоты, полипептиды и т. д. Затем в результате дезаминирования часть аминокислот разрушается с образованием аммиака и других органических соединений (спиртов, кетонов, кислот). В аэробных условиях органические кислоты полностью окисляются до углекислого газа и воды с выделением теплоты. В анаэробных условиях окисление жирных кислот не происходит, ввиду их накопления в окружающей среде, что может привести к ингибированию протекающих в необходимом направлении микробиологических процессов. Продукты промежуточного распада, такие как аминокислоты и дипептиды, ассимилируются в процессе микроорганизмами для создания своих клеточных структур [11–12].

На стадии охлаждения и созревания происходят восстановление полезной микробиоты и полное удаление аммиака, чем завершается процесс ферментации и достигается селективность суб-

страта. К концу процесса аммиака не должно быть, поскольку даже в малых концентрациях он является ядом для самих грибов [12–14].

Кроме температуры, влажности, структуры субстрата чрезвычайно важным для эффективной ферментации является показатель отношения углерода к азоту (C : N). Оптимальное для развития микроорганизмов соотношение C : N должно находиться в интервале от 26 до 35. Наличие избытка углерода (сахаров) в исходном материале приводит к тому, что из-за отсутствия достаточной концентрации аммиака не достигается щелочная реакция, которая должна быть неблагоприятной для конкурирующей микробиоты. В случае дефицита углерода нарушаются процессы ассимиляции (т. е. усвоение микроорганизмами аминокислот и белковых веществ) [2, 12, 13].

В качестве объектов исследований были изучены грибные субстраты, приготовленные по классической рецептуре (метод Пешке) и по модифицированной рецептуре с добавлением жома. Выбор свекловичного жома в качестве одного из компонентов субстрата основывается на его физико-химических и экономических составляющих. Свекловичный жом является отходом, который образуется в процессе производства свекловичного сахара. Использование его в отличие от товарного сырья позволяет снизить себестоимость производства субстрата, а наличие питательных веществ – стимулировать развитие мицелия. В состав жома входят (% к общей массе): пектиновые вещества – 48–50, целлюлоза – 22–25, гемицеллюлозы – 21–23, азотистые вещества – 1,8–2,5, зола – 0,8–1,3, сахара – 0,15–0,20, витамины (ВВ В₂, В₆, С и др.), ферменты, небольшие количества жира и фитостеринов, микроэлементов [15–16]. Кроме того, жом обладает высокой водопоглощающей способностью, которая позволяет, если он в сухом виде, увеличивать ему свой объем в 3 раза [17].

Проведение группового анализа начиналось с выделения битумов (Б) – твердых или смолоподобных материалов, представляющих собой смесь углеводородов и их производных, которые иногда могут появляться в следовых количествах в грибном субстрате [18]. На рис. 1 представлены данные по битуминозности субстратов. В обоих случаях наблюдается повышение, а затем снижение средних показателей. В среднем выход Б варьировался от 1,5–2 до 8–11 %. Наибольший выход Б отмечался для классического субстрата. Наличие Б может указывать на присутствие в субстрате лигнин- и целлюлолитических микроорганизмов (относятся к группе термофилов), ответственных за гидролиз лигнина и целлюлозы, поскольку их присутствие коррелирует с образованием Б. Лигнин и целлюлоза являются источником питания и энергии для данной группы микроорганизмов, которые участвуют в их расщеплении с выделением сахаров и других соединений, в то время как Б образуются в качестве вторичного продукта [14, 18].

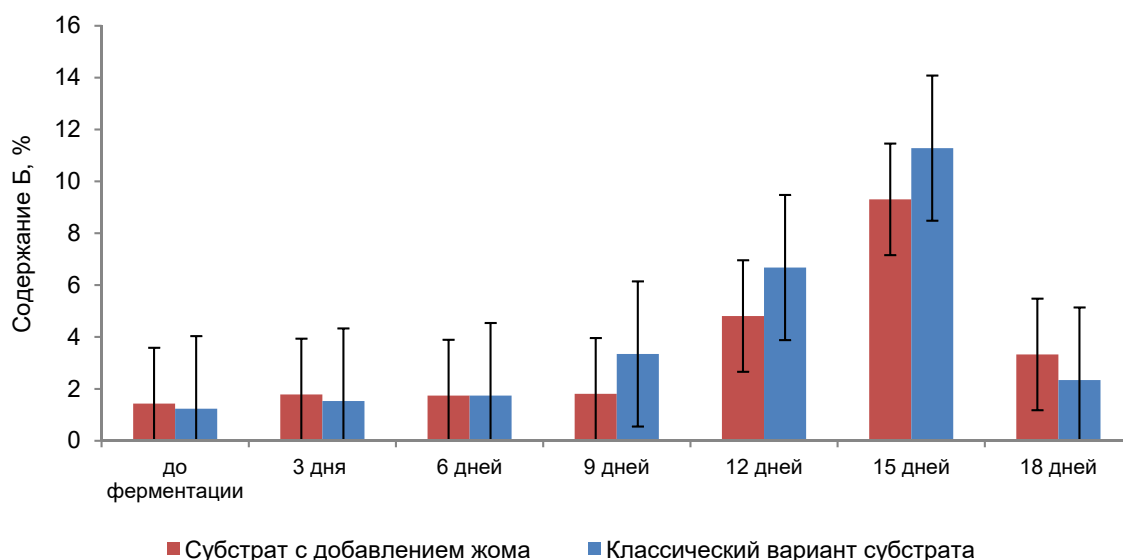


Рис. 1. Динамика изменения общего содержания битумов (Б) на стадии ферментации

Fig. 1. Dynamics of change in the total content bitumens (B) at the fermentation stage

Из всех выделенных соединений наибольшее содержание в субстрате составляют легкогидролизуемые и водорастворимые вещества (ЛГВ), которые включают в свой состав сахара, такие как ксилоза, глюкоза, манноза, галактоза; некоторые полисахариды, минеральные соли и т. д. На рис. 2 представлены результаты содержания ЛГВ от начала и до конца ферментации.

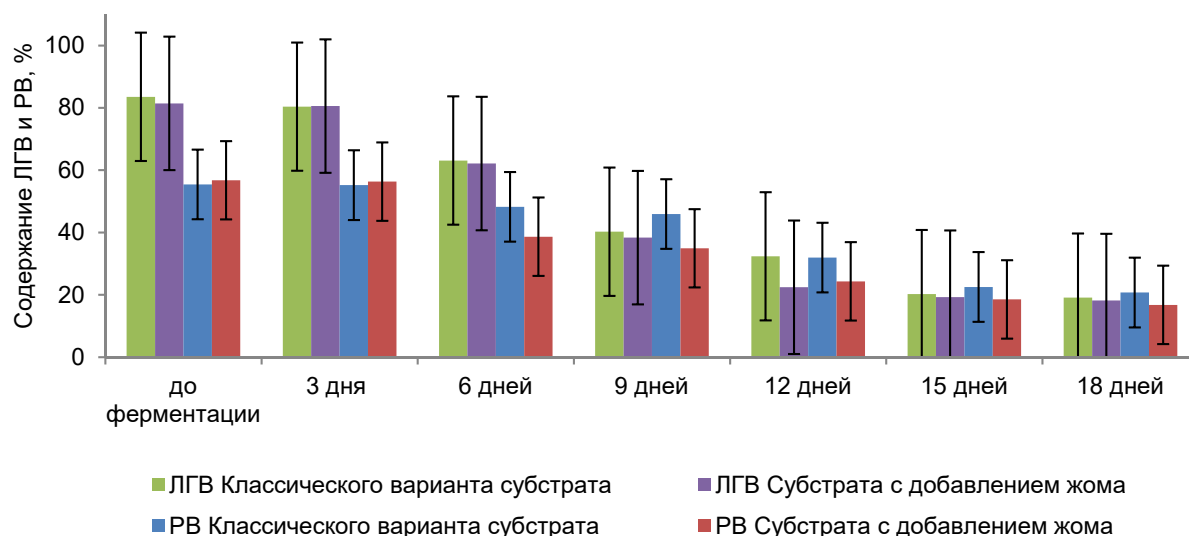


Рис. 2. Динамика изменения общего содержания легкогидролизуемых и водорастворимых веществ (ЛГВ) и редуцирующих веществ (РВ) на стадии ферментации

Fig. 2. Dynamics of changes in total easily hydrolyzable and water-soluble substances (EHWSS) and reducing substances (RS) content at the fermentation stage

Содержание ЛГВ до ферментации составляет 80–83 %, ближе к концу наблюдается снижение показателей до 14–15 %. ЛГВ являются «доступным» источником для мезофильной микробиоты, поэтому начинают первый этап ферментации. В процессе ферментации, в ходе которого субстрат истощается, вначале отмечаются высокие показатели ЛГВ, которые после 3-го дня постепенно уменьшаются как для классического субстрата, так и для субстрата с жомом, что объясняется преобладанием там термофильной микробиоты, способной разлагать ТГВ и НГВ, и выделением высоких концентраций аммиака, ингибирующего развитие мезофилов.

Одновременно с выделением легкогидролизуемых веществ выделялись и редуцирующие вещества (РВ) по методу Макаэна и Шоорля [10]. РВ – это химические соединения, снижающие степень окисления другого вещества, в данном случае грибного субстрата. В субстрате, кроме влияния на кислотность среды, они являются источником питания для мезофильных микроорганизмов на первых стадиях ферментации. К РВ в первую очередь относятся моносахариды (глюкоза, фруктоза), некоторые аминокислоты (глутаминовая, аспарагиновая), органические кислоты (уксусная, лимонная, молочная и т. д.) [13–14]. Анализ эксперимента показывает, что содержание РВ до ферментации находится в пределах 53–56 %, с течением времени данный показатель к концу процесса снижается до 16–20 % (см. рис. 2). Это согласуется с данными, полученными при выделении ЛГВ.

Гуминовые вещества (ГВ) представляют собой сложные смеси высокомолекулярных соединений природного происхождения, образующихся при разложении растительных и животных остатков под действием микроорганизмов и абиотических факторов окружающей среды. ГВ [10,19] подразделяют на две составляющие: гуминовые кислоты (ГК) – фракция ГВ, растворимая в щелочах и нерастворимая в кислотах (при $\text{pH} < 2,0$); фульвокислоты (ФК) – фракция ГВ, растворимая и в щелочах, и в кислотах. В исследованиях содержание ГВ достигало 13–15 % (рис. 3), из них большую часть составляли ФК, меньшую часть – ГК.

В процессе расщепления лигнина и целлюлозы происходит образование лигнино-гумусового комплекса, которое схоже с гумусообразованием в почвах. Визуально оно проявляется в виде темных пятен и ломкости самой соломы. Представленный комплекс состоит из «остатков» лигнина и целлюлозы, связанных с ГВ, и является источником питания для грибов, но не для конкурирующей плесени. Тем самым достигается селективность субстрата [14, 20].

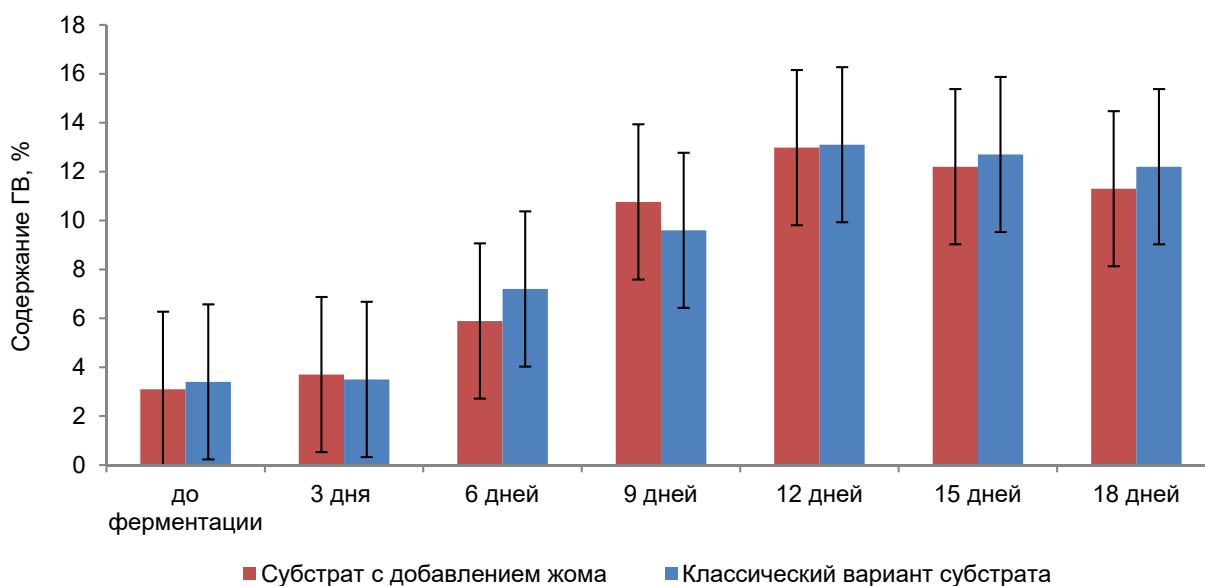


Рис. 3. Динамика изменения общего содержания гуминовых веществ (ГВ) на стадии ферментации

Fig. 3. Dynamics of change in total content humic substances (HC) at the fermentation stage

Ввиду устойчивости ГВ к микробной биодegradации, небольшая часть ГВ может оставаться в субстрате после завершения ферментации и использоваться микроорганизмами в качестве источника питания и энергии. К деструкторам ГВ относятся бактерии родов *Bacillus* и *Lactobacillus*, грибы родов *Chaetomium* и др. [11, 13]. Наблюдается взаимосвязь содержания ГВ и лигнина вместе с целлюлозой: с увеличением показателей ГВ снижается содержание целлюлозы и лигнина. Считается, что формирование ГВ происходит за счет активности бактериальных ферментов (например: фенолоксидаз, лакказ, пероксидаз), которые выделяются в основном термофильной микробиотой. Как правило, наиболее богаты гумусовыми веществами субстраты на основе отходов ферм, птицефабрик и пищевых производств [13].

Лигнин представляет собой природный биополимер, содержащийся в растительных клетках. В клеточной стенке он связан с другими биополимерами – целлюлозой и гемицеллюлозой, и представляет своеобразный барьер для проникновения ферментов или растворов в лигноцеллюлозную структуру древесины, обеспечивая тем самым защиту и прочность. Наиболее интенсивно разлагают лигнин базидиомицеты, из них класс *Dacrymycetales* и ряд представителей агариковых грибов (*Agaricales*); аскомицеты (*Ascomycetes*); дрожжи (*Saccharomycotina*). Р. Гартиг, впервые описавший процесс биодegradации древесины грибами, разделил базидиомицеты на две большие группы: грибы белой гнили и грибы бурой гнили [21]. Основное различие между ними заключается в том, что представители первой группы способны разрушать лигнин в клеточной стенке растений и не затрагивать целлюлозу. Представители второй группы, наоборот, предпочитают целлюлозу лигнину. В основном за деградацию лигноцеллюлозной биомассы ответственны бактерии с низким содержанием пар гуанина и цитозина, в частности, относящиеся к *Bacillales*, *Clostridiales*, *Actinomycetales* и *Thermoanaerobacterales* [11–13]. В термофильной стадии было установлено присутствие следующих видов термофильных бактерий, способных разлагать лигниноцеллюлозный комплекс: *Thermoactinomyces vulgaris*, *Actinobifida chromogena*, *Micromonospora carbonacea*, *Streptomyces thermovulgaris*, *Streptomyces lincolnensis*, *Streptomyces variegatus*, *Streptomyces lusitanus* и др. [13]. Общее содержание лигнина для классического субстрата ставило от 2,1–3,0 %, для субстрата с добавлением жома – от 2,2–3,1 % (рис. 4). С целлюлозой ситуация аналогична лигнину. Она также является природным полимером, входящим в состав высших растений и придающим им прочность. Общее содержание для классического субстрата составило от 5,2 до 8,76 %, для субстрата с добавлением жома – от 5,2 до 8,2 % (см. рис. 4). Более высокое содержание целлюлозы может быть связано с возможностью базидиальных грибов как единственных представителей группы грибов белой гнили разлагать преимущественно лигнин. В отличие от грибов большинство актиномицетов-лигнолитиков, обитающих в различных приготовленных компостах, способны лишь сольюбилизовать и модифицировать структуру молекулы лигнина, однако их возможности к минерализации лигнина ограничены [11–14].

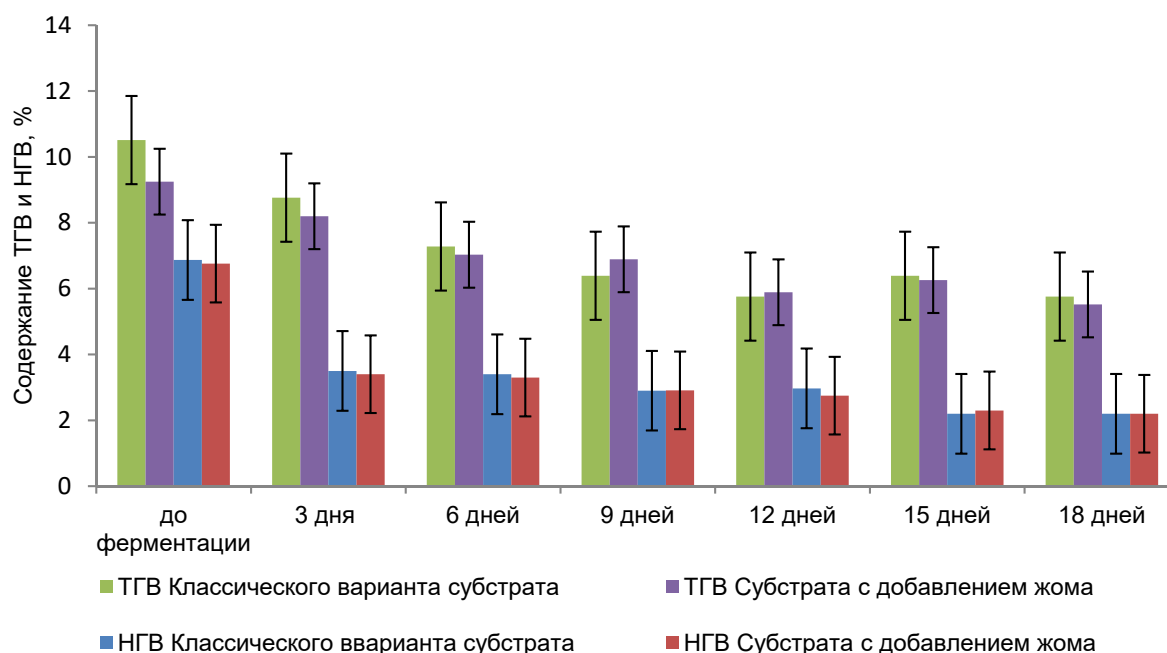


Рис. 4. Динамика изменения общего содержания трудногидролизующих веществ (целлюлозы) (ТГВ) и негидролизующих веществ (лигнин) (НГВ) на стадии ферментации

Fig. 4. Dynamics of changes in total difficult-to-hydrolyze substances (cellulose) (DHS) and non-hydrolyzable substances (lignin) (NHS) content at the fermentation stage

Закключение. Метод изучения оценки группового состава субстрата может являться основой для оценки качества субстрата. Одним из главных показателей является содержание ЛГВ и РВ, поскольку на начальной стадии ферментации они служат источником питания для мезофильной микрофлоры, которая на этой стадии активна. В начале ферментации отмечаются высокие показатели ЛГВ, значительная часть которых составляют РВ (до 50 %), в конце отмечается снижение обоих показателей. Из данных литературы известно, что мезофильные микроорганизмы способны усваивать только простые и доступные вещества, такие как сахара и пектины, в то время как сложные соединения (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) для них пока не доступны. По окончании ферментации наблюдается, что с уменьшением ЛГВ одновременно происходит увеличение ГВ в субстрате. Данный момент возможно объяснить с двух позиций. Первая предполагает истощение питательных веществ, в первую очередь сахаров, первоначально входящих в состав обоих субстратов, мезофильной микрофлорой. Другая позиция связана с активной биодegradацией трудноусваиваемых соединений термофилами, в результате которой образуется лигнин-гумусовый комплекс, который будет служить основным источником питания [4, 13, 21]. Вторым показателем является содержание ГВ, возрастающее на протяжении всего процесса ферментации, в ходе которого при расщеплении лигнина и целлюлозы образуется лигнин-гумусовый комплекс, который, согласно источникам литературы, станет перерабатываться грибами, но не будет доступен большей части конкурентной микрофлоры.

Присутствие Б, целлюлоза и лигнин в грибных субстратах позволяют судить о качестве произошедшей ферментации, поскольку между данными показателями отмечается взаимосвязь. Лигнин и целлюлоза служат источником питания и энергии для микроорганизмов, участвующих в их расщеплении с выделением сахаров и других соединений, в то время как Б образуются в качестве вторичного продукта и, как правило, в следовых количествах. Снижение количества лигнина и целлюлозы предполагает более доступную энергию, а соответственно, и меньшую зависимость от внешних питательных веществ (например, сахаров). Содержание целлюлозы и лигнина, которые, будучи менее доступными соединениями для большинства микроорганизмов в самом начале, к концу ферментации уменьшались. Примечательно, что содержание лигнина в субстратах меньше, чем целлюлозы, что согласуется с литературными данными о природе грибов белой гнили, предпочитающих расщепление негидролизующий остаток (лигнин), чем целлюлозу. С уменьшением лигнина и целлюлозы отмечается уменьшение количества Б в субстрате. Контроль уровня всех трех показателей необходим, поскольку при избыточном накоплении Б происходит подавление роста мицелия, что, соответственно, приводит к снижению урожайности, уменьшению размеров грибов и другим неблагоприятным последствиям. В случае недостатка лигнина и целлюлозы происходит ослабление мицелия и снижение его устойчивости к конкурентной микрофлоре, естественно присутствующей в субстрате.

Список использованных источников

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь – интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=141211>. – Дата доступа: 27.03.2024.
2. Еникиев, Р. И. Технология приготовления питательных субстратов для выращивания шампиньонов / Р. И. Еникиев, А. Р. Ибатуллина // *NovalInfo*. – 2017. – № 59. – С. 158–162.
3. 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.
4. Industrially Important Fungi for Sustainable Development / A. M. Abdel-Azeem [et al.]. – Switzerland : Springer Nature, 2021. – Vol. 1 : Biodiversity and Ecological Perspectives. – 589 p.
5. Гарибова, Л. В. Выращивание грибов / Л. В. Гарибова. – М. : Вече, 2005. – 94 с.
6. Нурметов, Р. Д. Выращивание шампиньонов и вешенки : руководство / Р. Д. Нурметов, Н. Л. Девочкина – М. : Россельхозакадемия, 2010. – 68 с.
7. Иванов А. И. Шампиньоны России (род *Agaricus* L.). Видовой состав, экология, культивирование / А. И. Иванов. – Пенза : РИО ПГАУ. – 2017. – 200 с.
8. Биоконверсия целлюлозосодержащего сырья. ферментативный гидролиз целлюлозы (обзор литературы) / А. А. Шубаков. [и др.] // *Известия Коми научного центра УРО РАН*. – 2022. – Т. 4, № 56. – С. 27–34.
9. Обзор современных исследований по ферментативному гидролизу лигноцеллюлозосодержащего сырья / Ш. Келдиёрова [и др.] // *Вестник науки*. – 2020. – Т. 1, № 24. – С. 96–99.
10. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
11. Микробиологические аспекты выращивания высших грибов / М. Г. Саубенова [и др.] // *Микробиология және вирусология*. – 2021. – Т. 3, № 34. – Р. 1–10.
12. Лысак, В. В. Микробиология. Практикум : пособие / В. В. Лысак, Р. А. Желдакова, О. В. Фомина. – Минск : БГУ, 2015. – 115 с.
13. Состав микробного сообщества на разных стадиях компостирования, перспектива получения компоста из муниципальных органических отходов (обзор) / А. Н. Ножевникова [и др.] // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 211–221.
14. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity : a review by / N. Suwanarach [et al.] // *Biology*. – 2022. – Vol. 11, № 4. – P. 1–33.
15. Технические материалы на основе свекловичного жома / Б. А. Кулишов [и др.] // *Вестник технического университета*. – 2015. – Т. 18, № 23. – С. 72–77.
16. Погарелова, Ю. Н. Новые направления использования свекловичного жома в республике Беларусь / Ю. Н. Погарелова, Ж. В. Бондаренко // *Труды БГТУ. Сер. IV, Химия, технология органических веществ и биотехнология* / Бел. гос. технол. ун-т. – Минск, 2009. – Вып. 17. – С. 266–269.
17. Исследование сорбционных свойств целлюлозы свекловичного жома по отношению к ионам никеля / Т. А. Кузнецова [и др.] // *Химия растительного сырья*. – 2020. – № 2. – С. 307–314.
18. Pannekens, M. Natural bitumen is an extraordinary habitat for microorganisms : dr. rer. nat sci. diss. / M. Pannekens. – Dustburg, 2021, 155 p.
19. Орлов, Д. С. Химия почв / Д. С. Орлов. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 259 с.
20. Kulikova, N. A. Interactions between Humic Substances and Microorganisms and Their Implications for Nature-like Bioremediation Technologies / N. A. Kulikova, I. V. Perminova // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26, № 9. – P. 1–32.
21. Феофилова, Е. П. Лигнин: химическое строение, биodeградация, практическое использование (обзор) / Е. П. Феофилова, И. С. Мысякина // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2016. – Т. 52, № 6. – С. 559–569.

References

1. *Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. Interaktivnaya informacionno-analiticheskaya sistema rasprostraneniya oficial'noj statisticheskoy informacii* [National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Interactive information and analytical system for disseminating official statistical information]. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=141211> (accessed 27 March, 2024).
2. Enikiev R. I., Ibatullina A. R. *Tekhnologiya prigotovleniya pitatel'nyh substratov dlya vyrashchivaniya shampin'onov* [Technology for preparing nutrient substrates for growing champignons]. *NovalInfo*, 2017, no. 59, pp. 158–162. (in Russian)
3. 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.
4. Abdel-Azeem A. M., Yadav A. N., Yadav N., Usmani Z. Industrially Important Fungi for Sustainable Development. Volume 1: Biodiversity and Ecological Perspectives. Switzerland, Springer Nature, 2021, 589 p.
5. Garibova L. V. *Vyrashchivanie gribov* [Growing mushrooms]. Moscow, Vech Publ., 2005, 94 p. (in Russian)
6. Nurmetov R. D., Devochkina N. L. *Vyrashchivanie shampin'onov i veshenki: rukovodstvo* [Growing champignons and oyster mushrooms: a guide]. Moscow, Russian Agricultural Academy Publ., 2010, 68 p. (in Russian)
7. Ivanov A. I. *Shampin'onny Rossii (rod Agaricus L.). Vidovoj sostav, ekologiya, kul'tivirovanie* [Champignons of Russia (genus *Agaricus* L.). Species composition, ecology, cultivation]. Penza, RIO PSAU Publ., 2017, 200 p. (in Russian)

8. Shubakov A. A., Mikhailova E. A., Martynov V. V. *Biokonversiya cellyulozosoderzhashchego syr'ya. fermentativnyy gidroliz cellyulozy (obzor literatury)* [Bioconversion of cellulose-containing raw materials. enzymatic hydrolysis of cellulose (literature review)]. *Izvestiya Komi nauchnogo centra URO RAN = News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the RAS*, 2022, vol. 4, no. 56, pp. 27–34. (in Russian)
9. Keldiyorova Sh., Toshmurodov D., Alikulov B. *Obzor sovremennykh issledovaniy po fermentativnomu gidrolizu ligno-cellyulozosoderzhashchego syr'ya* [Review of modern research on the enzymatic hydrolysis of lignocellulose containing raw materials]. *Vestnik Nauki = Bulletin of Science*, 2020, vol. 1, no. 24, pp. 96–99. (in Russian)
10. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and Technology Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
11. Saubenova M. G., Oleynikova E. A., Ermekbay Zh. N., Aitzhanova A. A., Bokenov D. D. *Mikrobiologicheskie aspekty vyrashchivaniya vysshikh gribov* [Microbiological aspects of growing higher mushrooms]. *Mikrobiologiya zhene virusologiya = Microbiology and Virology*, 2021, vol. 3, no. 34, pp. 1–10. (in Russian)
12. Lysak, V. V., Zheldakova R. A., Fomina O. V. *Mikrobiologiya. Praktikum* [Microbiology. Workshop]. Minsk, BSU Publ., 2015, 115 p. (in Russian)
13. Nozhevnikova A. N., Mironov V. V., Botchkova E. A., Litt Y. I., Rusakova Y. V. *Sostav mikrobnogo soobshchestva na raznykh stadiyakh kompostirovaniya, perspektiva polucheniya komposta iz municipal'nykh organicheskikh othodov (obzor)* [Composition of the microbial community at different stages of composting, prospects for obtaining compost from municipal organic waste (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 3, p. 211–221. (in Russian)
14. Suwannarach N., Kumla J., Zhao Y., Kakumyan P. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity. *Biology*, 2022, vol. 11, no. 4, pp. 1–33.
15. Kulishov B. A., Zimagulova L. A., An T. L., Kanarsky A. V. *Tekhnicheskie materialy na osnove sveklovichnogo zhoma* [Technical materials based on beet pulp]. *Vestnik tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Technical University*, 2015, vol. 18, no. 23, pp. 72–77. (in Russian)
16. Pogarelova Yu. N., Bondarenko Zh. V. *Novye napravleniya ispol'zovaniya sveklovichnogo zhoma v respublike Belarus'* [New directions for the use of beet pulp in the Republic of Belarus]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. IV, Himiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya* [Proc. of the Belarusian State Technological University. Ser. IV, Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology]. Minsk, 2009, no. 17, pp. 266–269. (in Russian)
17. Kuznetsova T. A., Pestov N. A., Revin V. V. *Issledovanie sorbcionnykh svoystv cellyulozy sveklovichnogo zhoma po otnosheniyu k ionam nikelya* [Study of the sorption properties of beet pulp cellulose in relation to nickel ions]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2020, no. 2, pp. 307–314. (in Russian)
18. Pannekens M. Natural bitumen is an extraordinary habitat for microorganisms. Diss. dr. rer. nat sci. Dustburg, 2021, 155 p.
19. Orlov D. S. *Himiya pochv* [Soil chemistry]. Moscow, MSU Publ., 1992, 259 p. (in Russian)
20. Kulikova N. A., Perminova I. V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 9, pp. 1–32.
21. Feofilova E. P., Mysyakina I. S. *Lignin: himicheskoe stroenie, biodegradaciya, prakticheskoe ispol'zovanie (obzor)* [Lignin: chemical structure, biodegradation, practical use (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 559–569. (in Russian)

Информация об авторах

Янута Григорий Григорьевич – кандидат биологических наук, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanutag@rumbler.by

Шелоник Мария Александровна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

Information about authors

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.by

Mariya A. Shelonik – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-185-196>
УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

Поступила в редакцию 06.05.2024
Received 06.05.2024

ГЕНОТИПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БИОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И АНТИОКСИДАНТНОГО КОМПЛЕКСА ПЛОДОВ ГОЛУБИКИ ВЫСОКОРОСЛОЙ (*Vaccinium Corymbosum* L.) В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

Ж. А. Рупасова, С. Н. Авраменко, К. А. Добрянская,
Д. О. Сулим, Н. Б. Павловский, О. В. Дрозд

Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты сравнительного исследования в южной агроклиматической зоне Беларуси биохимического состава и уровней антиоксидантной и ферментативной активностей плодов шести новых интродуцируемых сортов голубики высокорослой: раннеспелых Chanticleer и Hannah's Choice, среднеспелых Bluegold и Harrison, позднеспелых Aurora и Rubel, а также соответствующих данным группам спелости районированных сортов Weymouth, Bluecrop и Elliott. Выявлена существенная зависимость их биохимического состава, а также антиоксидантной и ферментативной активностей от генотипа растений. Установлено, что тестируемые раннеспелые сорта в 1,7 и 2,0 раза уступали сорту Weymouth по качеству плодов, а среднеспелые превосходили в этом плане эталонный сорт Bluecrop в 2,3 и 8,0 раза при наибольших различиях у сорта Bluegold, превосходившего сорт Harrison по качественному составу плодов в 3,5 раза, тогда как позднеспелый сорт Aurora в 2,5 раза отставал от сорта Elliott по интегральному уровню питательной и витаминной ценности плодов, а сорт Rubel, напротив, превосходил его в этом плане в 4,5 раза при превышении данного показателя у сорта Aurora в 11,3 раза. В соответствующих таксономических группах обосновано лидирующее положение по качественному составу плодов сортам Weymouth, Bluegold и Rubel.

Установлено, что наиболее высокой антиоксидантной и ферментативной активностью плодов характеризовались позднеспелые сорта голубики – Elliott и особенно Rubel, тогда как наименьшей – среднеспелый сорт Bluecrop. Выявлено отставание обоих тестируемых раннеспелых сортов и позднеспелого Aurora от соответствующих районированных сортов по антиоксидантной, каталазной, пероксидазной и полифенолоксидазной активности плодов и превышение эталонного уровня данных показателей у обоих тестируемых среднеспелых сортов и позднеспелого сорта Rubel. Установлено полное совпадение сортовых рядов голубики высокорослой по изменению уровней антиоксидантной и ферментативной активности плодов, а также интегрального уровня их питательной и витаминной ценности по совокупности биохимических характеристик.

Ключевые слова: голубика высокорослая; сорта; плоды; биохимический состав; органические кислоты; углеводы; биофлавоноиды; антиоксидантная активность; ферменты; каталаза; пероксидаза; полифенолоксидаза.

Для цитирования. Рупасова Ж. А., Авраменко С. Н., Добрянская К. А., Сулим Д. О., Павловский Н. Б., Дрозд О. В. Генотипические особенности биохимического состава и антиоксидантного комплекса плодов голубики высокорослой (*Vaccinium Corymbosum* L.) в условиях Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 185–196.

GENOTYPICAL FEATURES OF BIOCHEMICAL COMPOSITION AND ANTIOXIDANT COMPLEX OF FRUIT OF HIGH BLUEBERRY (*Vaccinium Corymbosum* L.) IN BELARUS CONDITIONS

Zh. A. Rupasova, S. N. Avramenko, K. A. Dobryanskaya,
D. O. Sulim, N. B. Pavlovsky, O. V. Drozd

Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The results of a comparative study in the southern agroclimatic zone of Belarus of the biochemical composition and levels of antioxidant and enzymatic activity of fruits of 6 new introduced varieties of highbush blueberries: early ripening Chanticleer and Hannah's Choice, mid-ripening Bluegold and Harrison, late ripening Aurora and Rubel, as well as those corresponding to these ripeness groups released varieties Weymouth, Bluecrop and Elliott. A significant dependence of their biochemical composition, as well as antioxidant and enzymatic activities on the plant genotype was revealed. It was found that the tested early-ripening varieties were 1.7 and 2.0 times inferior to the Weymouth variety in terms of fruit quality, and the mid-ripening varieties were 2.3 and 8.0 times superior to the standard Bluecrop variety in this

regard, with the greatest differences in the Bluegold variety, which was superior to the Harrison variety in the quality composition of the fruits by 3.5 times, while the late-ripening variety Aurora was 2.5 times behind the Elliott variety in terms of the integral level of nutritional and vitamin value of fruits, and the Rubel variety, on the contrary, surpassed it in this regard by 4.5 times, exceeding this indicator in varieties Aurora by 11.3 times. In the corresponding taxonomic groups, the leading position in the qualitative composition of fruits of the varieties Weymouth, Bluegold and Rubel is justified.

It was found that the highest antioxidant and enzymatic activity of fruits was characterized by late-ripening blueberry varieties – Elliott and especially Rubel, while the lowest – by the mid-ripening variety Bluecrop. It was revealed that both tested early-ripening varieties and the late-ripening Aurora lag behind the corresponding zoned varieties in terms of antioxidant, catalase, peroxidase and polyphenoloxidase activity of fruits and that both tested mid-ripening varieties and the late-ripening Rubel variety exceeded the reference level of these indicators. A complete coincidence of highbush blueberry varietal series was established in terms of changes in the levels of antioxidant and enzymatic activity of the fruit, as well as the integral level of their nutritional and vitamin value based on the totality of biochemical characteristics.

Keywords: highbush blueberry; varieties; fruits; biochemical composition; organic acids; carbohydrates; bioflavonoids; antioxidant activity; enzymes; catalase; peroxidase; polyphenol oxidase.

For citation. Rupasova Zh. A., Avramenko S. N., Dobryanskaya K. A., Sulim D. O., Pavlovsky N. B., Drozd O. V. Genotypical features of biochemical composition and antioxidant complex of fruit of high blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in Belarus conditions. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 185–196.

Введение. Возросший в последние годы интерес отечественных и зарубежных исследователей к поиску природных источников биологически активных соединений с повышенной антиоксидантной активностью (АОА) обусловлен их способностью к ингибированию процессов окисления с образованием малоактивных радикалов, легко выводящихся из организма. По мнению ряда авторов [1, 2], одной из наиболее перспективных для использования в медицинской практике групп природных антиоксидантов являются растительные полифенолы, чрезвычайно активно накапливающиеся в плодах многих плодовых и ягодных культур [3]. Наиболее известными природными источниками этих соединений являются интродуцированные растения семейства Ericaceae, в том числе голубика высокорослая, клюква крупноплодная и брусника обыкновенная [4–6]. Значительный интерес к исследованию биохимического состава ягодной продукции обозначенных видов растений, и прежде всего их Р-витаминного комплекса, обусловлен в первую очередь присущей его компонентам и другим биологически активным соединениям высокой АОА.

Вместе с тем важнейшую роль в обеспечении защиты растительных клеток от кислородных интермедиантов играют ферменты, способные обезвреживать супероксидные радикалы и перекисные соединения в клетках. Одним из важнейших компонентов антиокислительной системы растений является каталаза (КАТ) – двухкомпонентный фермент, состоящий из белка и соединенной с ним простетической группы, содержащей гематин [7]. Оптимум действия данного фермента, катализирующего дисмутацию H_2O_2 до H_2O и O_2 , установлен при pH 6,5, тогда как в более кислых и щелочных средах его активность снижается. В окисленном состоянии КАТ может работать и как пероксидаза (ПО), ускоряя окисление спиртов или альдегидов [8]. Вместе с тем ее активность существенно ингибируется сенильной кислотой, сероводородом, фторидами и в наибольшей степени нитрат-ионом [9, 10]. Существенную роль в метаболизме растений играет фермент ПО, восстанавливающая, как и КАТ, перекись водорода до воды, причем она осуществляет это с участием органических восстановителей [8]. Данный фермент катализирует реакции окисления органических и неорганических соединений с использованием пероксида водорода или органических перекисей в качестве акцепторов электронов. К субстратам, окисляемым ПО, могут быть отнесены практически все фенолы (пирокатехин, пирогаллол, галловая кислота, бензидин, фенилендиамин, билирубин), ароматические амины (аланин, диметилаланин, паратоллуидин), йодистый водород, аскорбиновая кислота, нитриты и ряд других соединений [11]. Доказано участие ПО в окислительно-восстановительных процессах фотосинтеза и дыхания, энергетического и азотного обмена, в образовании ауксинов и этилена, в регуляции развития и органогенеза растительного организма [12]. Антиоксидантную защиту, связанную с детоксикацией пероксидов, осуществляют, главным образом, аскорбатпероксидаза, а также глутатион- и гваяколпероксидаза. Ингибиторами данного фермента являются вещества, способные образовывать с железом соединения, разрывающие хотя бы одну из связей в его гемпротеиновом комплексе, что делает невозможным доступ перекисей к железу и таким образом инактивирует его работу [13].

Наряду с ПО активную роль в фенольном метаболизме растений играет терминальная оксидаза – полифенолоксидаза (ПФО), катализирующая окисление различных фенольных соединений в семихиноны и хиноны с участием молекулярного кислорода, тогда как ПО осуществляет это с участием перекисей, преимущественно перекиси водорода [14]. Наличие нескольких ферментов, выполняющих одну и ту же каталитическую функцию, – весьма ценное свойство, расширяющее адаптационные возможности растений, что особенно важно для их жизнедеятельности как организмов, не имеющих стабильной внутренней среды [15].

В связи с интродукцией в условия Беларуси новых таксонов вересковых, плоды которых чрезвычайно богаты биологически активными соединениями, в том числе биофлавоноидами, возникла необходимость в исследовании их биохимического состава с оценкой уровня антиоксидантной и ферментативной активности. По данному вопросу наиболее известны работы Ж. А. Рупасовой с соавторами [6, 16]. Однако только в отдельных публикациях этого автора представлена информация по оценке уровня антиоксидантной и ферментативной активности плодов. В частности, исследовано влияние минеральных и биологических удобрений на данные показатели у растений клюквы крупноплодной и выявлены органические соединения, являющиеся основными источниками данной активности [5]. Подобная работа выполнена также при изучении влияния способа размножения ряда промышленных сортов голубики высокорослой на биохимический состав и антиоксидантные свойства ягодной продукции [17].

В последние годы коллекционный фонд Центрального ботанического сада НАН Беларуси пополнился шестью новыми интродуцируемыми сортами голубики высокорослой разных сроков созревания: из раннеспелых – Chanticleer, Hannah's Choice, среднеспелых – Bluegold, Harrison, позднеспелых – Aurora, Rubel, для комплексной оценки процесса адаптации которых к местным условиям в качестве эталонов сравнения использованы соответствующие районированные сорта – Weymouth, Bluecrop и Elliott. В связи с сортоизучением обозначенных таксонов данного вида особый научный и практический интерес в этой работе представляло сравнительное исследование в сортовом ряду биохимического состава, а также уровней АОА и основных ферментов окислительно-восстановительного цикла – КАТ, ПО и ПФО, что позволило выявить таксоны, обладающие наиболее высокими значениями данных показателей.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены в 2023 г. на экспериментальном участке отраслевой лаборатории интродукции и технологии нетрадиционных ягодных растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси (Ганцевичский район Брестской области) на осушенной торфяно-болотной почве. Погодные условия в весенние месяцы характеризовались более высоким, чем обычно, температурным фоном при чрезвычайно остром дефиците влаги в мае, во время цветения растений, сопровождаемым значительными перепадами температуры воздуха, поскольку даже в июне отмечено снижение ее до отрицательных значений, тогда как вторая половина сезона характеризовалась жаркой погодой с обилием атмосферных осадков.

Исследование биохимического состава плодов опытных растений осуществляли по широкому спектру показателей, относящихся к разным классам действующих веществ. В период созревания плодов голубики в свежих усредненных пробах содержание сухих веществ определяли по ГОСТ 28561-90 [18]; аскорбиновой кислоты (витамина С) – стандартным индофенольным методом [19]; титруемых кислот (общей кислотности) – объемным методом [19]. В высушенных при температуре 60 °С пробах растительного материала определяли содержание гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую) – спектрофотометрическим методом [20]; растворимых сахаров – ускоренным полумикрометодом [21]; пектиновых веществ – кальциево-пектатным методом [22]; суммы антоциановых пигментов – по методу Т. Swain, W. E. Hillis [23], с построением градуировочной кривой по кристаллическому цианидину, полученному из плодов аронии черноплодной и очищенному по методике Ю. Г. Скориковой и Э. А. Шафтан [24]; собственно антоцианов и суммы катехинов (с использованием ванилинового реактива) – фотоэлектроколориметрическим методом [19, 25]; суммы флавонолов (в пересчете на рутин) – спектрофотометрическим методом [19]; дубильных веществ (танинов) – титриметрическим методом Левенталю [26]. АОА этанольных экстрактов из свежих плодов определяли с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) [27, 28]. Активность окислительно-восстановительных ферментов определяли следующими методами: ПО – по методу А. Н. Бояркина [29]; ПФО – с пирокатехином по методу [30]; КАТ – по методу А. Н. Баха и А. И. Опарина [31].

Все аналитические определения выполнены в трехкратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Сравнительное исследование 14 количественных характеристик биохимического состава плодов исследуемых сортов голубики высокорослой выявило весьма широкие диапазоны их варьирования в таксономическом ряду, что свидетельствовало о существенном влиянии на них генотипа растений (табл. 1).

Как следует из табл. 2, все раннеспелые сорта голубики характеризовались более активным, чем у сорта Weymouth, накоплением в плодах сухих веществ, тогда как для среднеспелого Bluegold показано усиление их накопления по сравнению с сортом Bluecrop при отсутствии достоверных различий с ним у сорта Harrison. При этом у позднеспелого сорта Rubel наблюдалась положительная направленность подобных различий с сортом Elliott при максимальной степени их проявления. Превышение эталонных значений содержания в плодах титруемых кислот выявлено лишь у двух тестируемых таксонов голубики – раннеспелого Chanticleer и среднеспелого Bluegold, тогда как во всех остальных случаях наблюдалось отставание от районированных сортов по данному признаку.

Таблица 1. Диапазоны варьирования в общем таксономическом ряду *Vaccinium corymbosum* биохимических характеристик плодов (в сухом веществе)**Table 1. Ranges of variation in the general taxonomic series of *Vaccinium corymbosum* for the biochemical characteristics of fruits (in dry matter)**

Показатель	Диапазон значений	Показатель	Диапазон значений
Сухие вещества, %	10,6–16,3	Собственно антоцианы, мг/100 г	4080–9487
Свободные органические кислоты, %	4,4–9,3	Лейкоантоцианы, мг/100 г	1756–3992
Аскорбиновая кислота, мг/100 г	243,2–466,2	Сумма антоциановых пигментов, мг/100 г	6474–13 000
Гидроксикоричные кислоты, мг/100 г	335,2–784,9	Катехины, мг/100 г	546–936
Растворимые сахара, %	39,7–52,3	Флавонолы, мг/100 г	1976–2503
Сахарокислотный индекс	4,8–10,9	Сумма биофлавоноидов, мг/100 г	9113–16 286
Пектиновые вещества, %	3,9–7,6	Дубильные вещества, %	1,02–3,10

Таблица 2. Относительные различия интродуцируемых сортов *Vaccinium corymbosum* с соответствующими срокам их созревания районированными сортами Weymouth, Bluecrop и Elliott по характеристикам биохимического состава плодов, %**Table 2. Relative differences between the introduced varieties of *Vaccinium corymbosum* and the zoned varieties Weymouth, Bluecrop and Elliott corresponding to their ripening dates according to the characteristics of the biochemical composition of the fruit, %**

Показатель	Раннеспелые сорта		Среднеспелые сорта		Позднеспелые сорта	
	Chanticleer	Hannah's Choice	Bluegold	Harrison	Aurora	Rubel
Сухие вещества	+30,2	+30,2	+8,9	–	–	+49,5
Свободные органические кислоты	+17,3	–15,4	+27,5	–33,3	–8,6	–17,2
Аскорбиновая кислота	–40,5	–43,5	–14,6	+20,1	–14,3	–44,2
Гидроксикоричные кислоты	–36,6	–17,1	+13,6	–37,5	+25,2	+9,4
Растворимые сахара	+6,4	+12,6	+5,8	+23,4	–5,4	+4,6
Сахарокислотный индекс	–9,9	+34,6	–17,2	+82,8	–	+25,9
Пектиновые вещества	+3,7	–6,4	+15,6	–	–32,7	+32,5
Собственно антоцианы	–27,5	–35,1	+52,0	+22,9	–15,5	+6,8
Лейкоантоцианы	+43,3	+14,2	+66,8	+16,4	–21,0	+58,1
Сумма антоциановых пигментов	–11,9	–24,2	+57,4	+20,5	–16,6	+17,1
Катехины	+4,7	–	+11,8	–	–5,3	+26,3
Флавонолы	–9,2	–12,0	+21,5	–	+11,4	+4,5
Сумма биофлавоноидов	–10,6	–21,0	+46,3	+14,7	–11,6	+15,6
Дубильные вещества	–25,0	–29,2	–9,1	–16,8	+17,1	+23,0

Примечание: прочерк означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий с соответствующими стандартными сортами при $p < 0,05$.

Вместе с тем все тестируемые объекты, за исключением среднеспелого сорта Harrison, отмечены на 14–44 % меньшим, чем у соответствующих стандартных сортов, содержанием аскорбиновой кислоты. Заметим, что если оба новых раннеспелых сорта характеризовались меньшим, чем у сорта Weymouth, накоплением в плодах гидроксикоричных кислот, то позднеспелые сорта, напротив, превосходили сорт Elliott в их содержании при разноориентированных различиях в этом плане среднеспелых сортов с сортом Bluecrop. При этом наблюдалось выраженное в разной степени обогащение плодов всех тестируемых таксонов голубики, за исключением позднеспелого Aurora, растворимыми сахарами на 5–23 % по сравнению с эталонными объектами, причем из-за различий темпов биосинтеза данных углеводов и титруемых кислот, показатель сахарокислотного индекса у сортов Chanticleer и Bluegold оказался ниже, чем у эталонных объектов, на 10 и 17 % соответственно, тогда как у сортов Hannah's Choice, Harrison и Rubel, он был, напротив, выше на 26–83 % при отсутствии достоверных различий у сорта Aurora (см. табл. 2). Для параметров накопления в плодах пектиновых веществ установлено превышение эталонных значений у сортов Chanticleer, Bluegold, Rubel и отставание от них у сортов Aurora, Hannah's Choice при отсутствии значимых различий у сорта Harrison. Что касается дубильных веществ, то среди тестируемых таксонов голубики более активным их накоплением по сравнению с эталонными объектами характеризовались позднеспелые сорта, особенно Rubel, тогда как для раннеспелых и среднеспелых сортов, напротив, показано отставание от них на 9–29 %.

Заметим, что для обоих тестируемых раннеспелых сортов и позднеспелого Aurora выявлено отставание от стандартных сортов по содержанию в плодах собственно антоцианов при более активном их накоплении у обоих среднеспелых сортов и позднеспелого Rubel. Это обусловило наличие подобных тенденций в характере различий тестируемых и эталонных объектов по суммарному количеству антоциановых пигментов. Обращает на себя внимание отсутствие достоверных различий сортов Hannah's Choice и Harrison с соответствующими стандартными сортами в содержании в плодах катехинов при более активном, чем у них, накоплении данных соединений у сортов Chanticleer, Bluegold и Rubel. В характере различий тестируемых таксонов голубики с эталонными объектами по содержанию в плодах флавонолов выявлено заметное сходство с таковым по содержанию гидроксикоричных кислот: отставание у раннеспелых сортов и превышение у позднеспелых при неоднозначных расхождениях у среднеспелых сортов. При этом в ориентации различий новых интродуцируемых таксонов с соответствующими эталонными объектами в общем содержании в плодах биофлавоноидов нашли отражение закономерности, аналогичные установленным для собственно антоцианов как доминирующего компонента Р-витаминного комплекса плодов данного вида. Так, более значительным (на 15–46 %), чем у соответствующих районированных сортов, общим накоплением этих ценных биологически активных соединений характеризовались оба тестируемых среднеспелых сорта, особенно Bluegold, а также позднеспелый Rubel, тогда как менее значительным (на 11–21 %) – оба раннеспелых сорта, особенно Hannah's Choice, и позднеспелый Aurora (см. табл. 2).

На основании результатов биохимического скрининга исследуемых сортов *V. corymbosum* выявлены объекты с наибольшими и, соответственно, наименьшими показателями качественного состава ягодной продукции в пределах соответствующих сортовых групп (табл. 3).

Таблица 3. Сорта *Vaccinium corymbosum* с наибольшими (max) и наименьшими (min) в пределах сортовых групп характеристиками биохимического состава плодов в годы исследований

Table 3. *Vaccinium corymbosum* varieties with the highest (max) and lowest (min) characteristics of the biochemical composition of fruits within the varietal groups during the years of research

Показатель	Раннеспелые сорта			Среднеспелые сорта			Позднеспелые сорта		
	Weymouth (st)	Chanticleer	Hannah's Choice	Bluecrop (st)	Bluegold	Harrison	Elliott (st)	Aurora	Rubel
Сухие вещества	min	max	max	min	max	min	min	min	max
Свободные органические кислоты	–	max	min	–	max	min	max	–	min
Аскорбиновая кислота	max	min	min	–	min	max	max	–	min
Гидроксикоричные кислоты	max	min	–	–	max	min	min	max	–
Растворимые сахара	min	–	max	min	–	max	–	min	max
Сахарокислотный индекс	–	min	max	–	min	max	min	min	max
Пектиновые вещества	–	max	min	min	max	min	–	min	max
Собственно антоцианы	max	–	min	min	max	–	–	min	max
Лейкоантоцианы	min	max	–	min	max	–	–	min	max
Сумма антоциановых пигментов	max	–	min	min	max	–	–	min	max
Катехины	min	max	min	min	max	min	–	min	max
Флавонолы	max	–	min	min	max	min	min	max	–
Сумма биофлавоноидов	max	–	min	min	max	–	–	min	max
Дубильные вещества	max	–	min	max	–	min	min	–	max

Оказалось, что в таксономическом ряду раннеспелых сортов районированный сорт Weymouth характеризовался наибольшим содержанием в плодах гидроксикоричных кислот, флавонолов, аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, антоциановых пигментов и биофлавоноидов в целом при наименьшем накоплении сухих веществ, растворимых сахаров, лейкоантоцианов и близких им по химической природе катехинов. Для сорта Chanticleer показано максимальное накопление в плодах сухих и пектиновых веществ, титруемых кислот, лейкоантоцианов и катехинов при минимальном содержании аскорбиновой и гидроксикоричных кислот и наименьшем значении сахарокислотного индекса. При этом сорт Hannah's Choice отмечен столь же высоким, как и у предыдущего таксона, содержанием в плодах сухих веществ, но в отличие от него, обнаружил наибольшее содержание растворимых сахаров при наиболее высоком показателе сахарокислотного индекса и минимальном количестве пектиновых веществ, свободных органических и аскорбиновой кислот и практически всех основных компонентов биофлавоноидного комплекса.

В таксономическом ряду среднеспелых сортов голубики районированный сорт Bluecrop характеризовался наиболее обедненным биохимическим составом плодов, поскольку при максимальном накоплении в них только дубильных веществ был отмечен наименьшим содержанием сухих и пектиновых веществ, растворимых сахаров и всех без исключения компонентов Р-витаминного комплекса.

В отличие от данного таксона, у сорта Bluegold, напротив, выявлены лидирующие позиции не только в накоплении последних, но также сухих и пектиновых веществ, титруемых и гидроксикоричных кислот при минимальном содержании лишь аскорбиновой кислоты и наименьшем значении сахарокислотного индекса. Сорт Harrison характеризовался наиболее высоким среди среднеспелых сортов накоплением в плодах аскорбиновой кислоты и растворимых сахаров при наибольшей величине сахарокислотного индекса и минимальном содержании свободных органических и гидроксикоричных кислот, пектиновых веществ, катехинов и флавонолов (см. табл. 3).

Среди позднеспелых сортов голубики районированный сорт Elliott обнаружил максимальное накопление в плодах свободных органических и аскорбиновой кислот при минимальном количестве сухих и дубильных веществ, гидроксикоричных кислот, флавонолов и наименьшем значении сахарокислотного индекса. При этом тестируемые позднеспелые сорта Aurora и Rubel характеризовались в основном минимальными в первом случае и максимальными во втором биохимическими показателями, указывавшими на разную степень их насыщенности биологически активными соединениями. Представленные в табл. 4 данные, полученные на основании табл. 2 и характеризовавшие направленность и степень выразительности сдвигов в биохимическом составе плодов новых интродуцируемых таксонов голубики высокорослой относительно соответствующих им районированных сортов, показали наличие заметных генотипических различий в направленности и величине вышеуказанных сдвигов.

Таблица 4. Относительные размеры, амплитуды и соотношения разноориентированных различий в биохимическом составе плодов новых интродуцированных сортов *Vaccinium corymbosum* с районированными сортами Weymouth, Bluecrop и Elliott, %

Table 4. Relative sizes, amplitudes and ratios of differently oriented differences in the biochemical composition of fruits of new introduced varieties of *Vaccinium corymbosum* with zoned varieties Weymouth, Bluecrop and Elliott, %

Сорт	Относительные различия, %			
	положительные	отрицательные	амплитуда	соотношение положительных/отрицательных
Chanticleer	105,6	171,2	276,8	0,6
Hannah's Choice	91,6	203,9	295,5	0,5
Bluegold	327,2	40,9	368,1	8,0
Harrison	200,8	87,6	288,4	2,3
Aurora	53,7	131,0	184,7	0,4
Rubel	273,3	61,4	334,7	4,5

С целью проведения ранжирования тестируемых объектов по данному признаку был использован методический прием, основанный на сопоставлении у них относительных размеров, амплитуд и соотношений статистически достоверных положительных и отрицательных отклонений от эталонных значений биохимических характеристик плодов [32]. По величине суммарной амплитуды выявленных отклонений, независимо от их знака, можно судить о выразительности различий каждого тестируемого таксона с эталонным сортом по совокупности всех анализируемых признаков, что позволяло судить о степени влияния генотипа растений на биохимический состав плодов. Соотношение же относительных размеров совокупностей положительных и отрицательных различий с ним являлось оценочным критерием степени преимуществ каждого тестируемого объекта относительно районированного и других сравниваемых с ним сортов голубики в биохимическом составе плодов в целом. При этом амплитуда относительных размеров выявленных различий тестируемых раннеспелых сортов голубики со стандартным сортом Weymouth по совокупности анализируемых признаков, независимо от их ориентации, варьировалась в диапазоне 276,8–295,5 % при наибольшей величине у сорта Hannah's Choice. У обоих среднеспелых сортов аналогичная амплитуда различий со стандартным сортом Bluecrop соответствовала области значений 288,4–368,1 % при наибольшей величине у сорта Bluegold, тогда как в группе позднеспелых сортов относительные различия со стандартным сортом Elliott по совокупности 14 биохимических характеристик составляли 184,7–334,7 % при наибольшей величине у сорта Rubel.

Вместе с тем в пределах обозначенных сортовых групп данный признак не мог служить критерием преимуществ каждого тестируемого объекта относительно других в содержании в плодах действующих веществ, поскольку указывал лишь на размах выявленных расхождений с соответствующими стандартными сортами в ту и другую сторону. Наиболее же объективное представление в этом плане мог дать кратный размер соотношения относительных величин совокупностей положительных и отрицательных различий с ними в биохимическом составе плодов, дающий представление о степени генотипических различий по интегральному уровню питательной и витаминной ценности последних. Если условно принять за единицу данный показатель у стандартных сортов голубики, принятых за эталоны сравнения, то оба тестируемых раннеспелых сорта примерно в равной степени (в 1,7 и 2,0 раза) уступали сорту Weymouth по качеству плодов. При этом оба среднеспелых сорта превосходили в этом

плане эталонный сорт Bluecrop в 2,3 и 8,0 раза при наибольших различиях у сорта Bluegold, превосходящего сорт Harrison по качественному составу плодов в 3,5 раза. В группе позднеспелых сортов голубики сорт Aurora значительно (в 2,5 раза) отставал от районированного сорта Elliott по интегральному уровню питательной и витаминной ценности плодов, тогда как сорт Rubel, напротив, превосходил его в этом плане в 4,5 раза при превышении данного показателя у сорта Aurora в 11,3 раза.

Таким образом, на основании сравнительного исследования биохимического состава плодов новых интродуцируемых и соответствующих им по срокам созревания районированных сортов голубики высокорослой по 14 показателям лидирующее положение по интегральному уровню их питательной и витаминной ценности среди раннеспелых сортов принадлежало районированному сорту Weymouth, среди среднеспелых – сорту Bluegold, среди позднеспелых – сорту Rubel.

Логично предположить, что при столь существенных генотипических различиях биохимического состава плодов в сортовых рядах голубики высокорослой должны проявиться не менее выразительные различия уровней их антиоксидантной и ферментативной активности. В пользу данного предположения свидетельствуют результаты аналогичных исследований Ж. А. Рупасовой с соавторами [33, 17] плодов клюквы крупноплодной и голубики высокорослой, показавшие отчетливую зависимость антиоксидантного комплекса плодов от генотипа растений. По нашим оценкам, приведенным в табл. 5, общий уровень АОА этанольных экстрактов из плодов сортов голубики с разными сроками созревания, выраженный в мкмоль экв. тролокса / г сухого вещества, варьировался при 10- и 30-минутной экспозициях в весьма широких, но вместе с тем довольно близких диапазонах значений, в первом случае составивших 50,2–110,7, во втором случае – 52,0–116,5.

Таблица 5. Антиоксидантная активность этанольных экстрактов из плодов сортов *Vaccinium corymbosum* в опытной культуре, мкмоль экв. тролокса/г сухого вещества

Table 5. Antioxidant activity of ethanol extracts from fruits of *Vaccinium corymbosum* varieties in an experimental culture, μmol trolox equiv/g dry matter

Сорт	АОА (ДФПГ·) через 10 мин		АОА (ДФПГ·) через 30 мин	
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	t	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	t
Weymouth (st)	90,6 \pm 0,2	–	91,9 \pm 0,7	–
Chanticleer	80,7 \pm 0,3	–27,4*	83,1 \pm 0,9	–7,8*
Hannah's Choice	72,6 \pm 0,4	–44,0*	74,5 \pm 0,5	–21,3*
Bluecrop (st)	50,2 \pm 0,1	–	52,0 \pm 0,2	–
Bluegold	91,2 \pm 0,2	260,1*	92,8 \pm 0,2	156,6*
Harrison	70,4 \pm 0,2	106,4*	72,7 \pm 0,3	57,1*
Elliott (st)	101,4 \pm 0,3	–	108,4 \pm 0,7	–
Aurora	83,0 \pm 0,6	–27,3*	85,5 \pm 0,1	–31,2*
Rubel	110,7 \pm 0,3	24,4*	116,5 \pm 0,6	8,6*

*Статистически значимые по t -критерию Стьюдента различия со стандартным сортом при $p < 0,05$.

Примечание: полужирным шрифтом выделены районированные сорта, используемые в качестве контроля.

Представляется вполне объяснимым соответствие уровня АОА при 30-минутной экспозиции области хотя и незначительно, но все же более высоких, нежели при 10-минутной экспозиции, значений, поскольку соединения, обладающие активностью, в процессе взаимодействия с катион-радикалами при менее продолжительной экспозиции обеспечивали хотя и основную, но все же неполный вклад в формирование антиоксидантных свойств ягодной продукции голубики, тогда как на последующей замедленной стадии, скорее всего, протекала реакция с катион-радикалами продуктов окисления биологически активных соединений, образовавшихся на начальной стадии данного процесса. Заметим, что подобная закономерность была обнаружена ранее в аналогичных исследованиях А. М. Макаревич и В. Н. Решетникова [33], а также Ж. А. Рупасовой с соавторами [17].

Вместе с тем значительная ширина приведенных диапазонов варьирования уровня АОА в сортовом ряду голубики высокорослой косвенно свидетельствовала о существенной зависимости данного показателя от генотипа растений, причем наиболее высоким уровнем АОА плодов при обеих экспозициях характеризовались позднеспелые сорта – районированный Elliott и особенно интродуцируемый Rubel, занимавшие лидирующее положение в общем таксономическом ряду по богатству биохимического состава, тогда как наименьшим уровнем АОА был отмечен среднеспелый районированный сорт Bluecrop.

Результаты определения активности основных окислительно-восстановительных ферментов в сухом веществе плодов голубики высокорослой (табл. 6), показали, что значения исследуемых показателей варьировались в общем сортовом ряду в следующих диапазонах значений: для КАТ – 5,2–13,5 мкмоль H_2O_2 /(г·мин), ПО – 1,2–10,0 ед. опт. плотн/(г·мин), ПФО – 78,5–203,9 ед. опт. плотн/(г·мин).

Нетрудно убедиться, что наиболее высоким уровнем активности всех ферментов окислительно-восстановительного цикла, как и АОА, характеризовались позднеспелые сорта – районированный Elliott и особенно интродуцируемый Rubel, а самым низким – среднеспелый районированный сорт Bluecrop. Как видим, и антиоксидантная, и ферментативная активность плодов голубики высокорослой, как и их биохимический состав, в значительной мере определялись генотипом растений, о степени влияния которого на исследуемые характеристики антиоксидантного комплекса можно судить по данным табл. 7.

Таблица 6. Активность окислительно-восстановительных ферментов в плодах сортов *Vaccinium corymbosum* в опытной культуре (в сухом веществе)

Table 6. Activity of redox enzymes in fruits of *Vaccinium corymbosum* varieties in an experimental culture (in dry matter)

Сорт	Активность КАТ, мкмоль H ₂ O ₂ /(г·мин)		Активность ПО, ед. опт. плотн./ (г·мин)		Активность ПФО, ед. опт. плотн./ (г·мин)	
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>
Weymouth (st)	7,2 ± 0,1	–	3,2 ± 0,1	–	100,5 ± 0,1	–
Chanticleer	6,8 ± 0,1	–3,0*	2,9 ± 0,1	–2,8*	96,7 ± 0,3	–12,7*
Hannah's Choice	5,7 ± 0,1	–15,7*	2,6 ± 0,1	–6,3*	80,1 ± 0,3	–64,7*
Bluecrop (st)	5,2 ± 0,1	–	1,2 ± 0,1	–	78,5 ± 0,3	–
Bluegold	8,2 ± 0,1	74,5*	4,4 ± 0,1	26,3*	197,6 ± 0,6	180,4*
Harrison	7,0 ± 0,1	23,1*	1,4 ± 0,1	4,9*	95,6 ± 0,2	49,4*
Elliott (st)	12,7 ± 0,1	–	9,8 ± 0,1	–	198,6 ± 0,2	–
Aurora	8,4 ± 0,2	–20,3*	9,3 ± 0,1	–4,9*	98,2 ± 0,5	–179,7*
Rubel	13,5 ± 0,1	10,6*	10,0 ± 0,2	0,8	203,9 ± 1,3	4,1*

*Статистически значимые по *t*-критерию Стьюдента различия со стандартным сортом при *p* < 0,05.

Примечание: полужирным шрифтом выделены районированные сорта, используемые в качестве контроля.

Таблица 7. Относительные различия новых интродуцируемых сортов *Vaccinium corymbosum* с соответствующими срокам их созревания районированными сортами Weymouth, Bluecrop и Elliott по характеристикам антиоксидантного комплекса плодов (в сухом веществе), %

Table 7. Relative differences between the new introduced varieties of *Vaccinium corymbosum* with the zoned varieties Weymouth, Bluecrop and Elliott corresponding to their ripening dates in terms of the characteristics of the antioxidant complex of fruits (in dry matter), %

Показатель	Раннеспелые сорта		Среднеспелые сорта		Позднеспелые сорта	
	Chanticleer	Hannah's Choice	Bluegold	Harrison	Aurora	Rubel
АОА (ДФПГ) через 10 мин	–10,9	–19,9	+81,7	+40,2	–18,1	+9,2
АОА (ДФПГ) через 30 мин	–9,6	–18,9	+78,4	+39,8	–21,1	+7,5
Активность КАТ	–5,6	–20,8	+57,7	+34,6	–33,9	+6,3
Активность ПО	–9,4	–18,8	+266,7	+16,7	–5,1	–
Активность ПФО	–3,8	–20,3	+151,7	+21,8	–50,6	+2,7
Совокупный эффект	–28,4	–78,8	+554,5	+112,9	–110,7	+16,5

Примечание: прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий со стандартным сортом при *p* < 0,05.

Оказалось, что оба интродуцируемых раннеспелых сорта голубики уступали районированному сорту Weymouth по уровню АОА на 10–19 % при наиболее выраженных различиях у сорта Hannah's Choice, что согласуется с показанным выше их отставанием от него и по богатству биохимического состава плодов в целом (см. табл. 4). В значительной степени это объясняет и менее высокий, чем у эталонного объекта, уровень их ферментативной активности. Наиболее существенными, причем практически сопоставимыми друг с другом у всех исследуемых ферментов, данные различия в пределах 19–21 % отмечены также у сорта Hannah's Choice, тогда как у сорта Chanticleer они не превышали 4–10 % при наибольшем отставании по уровню активности ПО.

В отличие от раннеспелых, для обоих тестируемых среднеспелых сортов голубики показано существенное превышение эталонного уровня АОА, составившее 40–80 %, наибольшее у сорта Bluegold, характеризовавшегося более значительным, чем у сорта Harrison, размером превышения эталонного уровня питательной и витаминной ценности плодов (см. табл. 4), в чем, как и в предыдущем случае, прослеживалась явная корреляция с их антиоксидантными свойствами. В этой связи

вполне закономерным представляется у них и более высокий, чем у сорта Bluecrop, уровень активности ферментов окислительно-восстановительного цикла. Наиболее выразительными (в пределах 58–267 %) данные различия – максимальные по активности ПО и минимальные по таковой КАТ – были у сорта Bluegold, тогда как у сорта Harrison они оказались существенно меньшими и варьировались в диапазоне 17–35 % при противоположной картине соответствия активности данных ферментов крайним значениям (см. табл. 7).

Что касается тестируемых позднеспелых сортов голубики, то в характере их различий с районированным сортом Elliott по уровню АОА выявлены неоднозначные тенденции. Так, если для сорта Aurora показано отставание от него на 21 %, то для сорта Rubel, напротив, превышение на 8 %, в чем, как и в двух предыдущих случаях, прослеживалась отчетливая корреляция с подобными различиями по богатству биохимического состава плодов сравниваемых объектов (см. табл. 4). Более низкий, чем у районированного сорта, уровень АОА в плодах первого таксона обусловлен заметным ослаблением по сравнению с ним их ферментативной активности на 5–51 %, наиболее значительным у ПФО и наименьшим у ПО, тогда как для сорта Rubel, характеризовавшегося наиболее высоким в данной сортовой группе интегральным уровнем питательной и витаминной ценности ягодной продукции, показано хотя и незначительное, но все же достоверное превышение эталонного уровня активности КАТ и ПФО на 6 и 3 % соответственно при сопоставимости с ним пероксидазной активности (см. табл. 7).

Как видим, в исследуемых таксономических рядах голубики высокорослой весьма отчетливо проявились выраженные в разной степени различия с соответствующими районированными сортами по исследуемым характеристикам антиоксидантного комплекса плодов, что указывает на их выраженную сортоспецифичность. На наш взгляд, для оценки влияния генотипа растений на общую величину выявленных различий, представлялось целесообразным для каждого тестируемого таксона произвести суммирование расхождений с эталонными объектами по всем исследуемым показателям, с учетом их знака. При этом вклад АОА в этот суммарный показатель оценивался по результатам 30-минутной продолжительности реакции. Оказалось, что общая величина данных расхождений позволила расположить исследуемые сорта голубики в порядке снижения антирадикальных свойств плодов в следующих последовательностях:

- раннеспелые сорта – Weymouth > Chanticleer > Hannah's Choice;
- среднеспелые сорта – Bluegold > Harrison > Bluecrop;
- позднеспелые сорта – Rubel > Elliott > Aurora.

Нетрудно убедиться в полном совпадении приведенной последовательности с аналогичной последовательностью при оценке сортовых различий по интегральному уровню питательной и витаминной ценности плодов голубики, что косвенно указывает на высокую корреляционную связь их антиоксидантных свойств с показанным выше высоким содержанием в них биологически активных соединений разной химической природы.

Заключение. В результате сравнительного исследования в южной агроклиматической зоне Беларуси биохимического состава и уровней антиоксидантной и ферментативной активностей плодов шести новых интродуцируемых сортов голубики высокорослой: раннеспелых Chanticleer и Hannah's Choice, среднеспелых Bluegold и Harrison, позднеспелых Aurora и Rubel, а также соответствующих данным группам спелости районированных сортов Weymouth, Bluecrop и Elliott.

Выявлена существенная зависимость их биохимического состава, а также антиоксидантной и ферментативной активностей от генотипа растений. Установлено, что тестируемые раннеспелые сорта в 1,7 и 2,0 раза уступали сорту Weymouth по качеству плодов, а среднеспелые превосходили в этом плане эталонный сорт Bluecrop в 2,3 и 8,0 раза при наибольших различиях у сорта Bluegold, превосходившего сорт Harrison по качественному составу плодов в 3,5 раза, тогда как позднеспелый сорт Aurora в 2,5 раза отставал от сорта Elliott по интегральному уровню питательной и витаминной ценности плодов, а сорт Rubel, напротив, превосходил его в этом плане в 4,5 раза при превышении данного показателя у сорта Aurora в 11,3 раза. В соответствующих таксономических группах обосновано лидирующее положение по качественному составу плодов сортам Weymouth, Bluegold и Rubel.

Установлено, что наиболее высокой антиоксидантной и ферментативной активностью плодов характеризовались позднеспелые сорта голубики – Elliott и особенно Rubel, тогда как наименьшей – среднеспелый сорт Bluecrop. Выявлено отставание обоих тестируемых раннеспелых сортов и позднеспелого Aurora от соответствующих районированных сортов по антиоксидантной, каталазной, пероксидазной и полифенолоксидазной активности плодов, а также превышение эталонного уровня данных показателей у обоих тестируемых среднеспелых сортов и позднеспелого сорта Rubel. Установлено полное совпадение сортовых рядов голубики высокорослой по изменению уровней антиоксидантной и ферментативной активности плодов, а также интегрального уровня их питательной и витаминной ценности по совокупности биохимических характеристик.

Список использованных источников

1. Прида, А. И. Природные антиоксиданты полифенольной природы (антирадикальные свойства и перспективы использования) / А. И. Прида, Р. И. Иванова // Пищевые ингредиенты. Сырье и добавки. – 2004. – № 2. – С. 76–78.
2. Влияние водных извлечений из лекарственных растений на процессы свободно-радикального окисления / М. А. Рыжикова [и др.] // Экспериментальная и клиническая фармакология. – 1999. – Т. 62, № 2. – С. 36–38.
3. Карабанов, И. А. Флавоноиды в мире растений / И. А. Карабанов. – Минск : Ураджай, 1981. – 80 с.
4. Голубика высокорослая. Оценка адаптационного потенциала при интродукции в условиях Беларуси / Ж. А. Рупасова [и др.] ; под ред. В. И. Парфенова. – Минск : Беларуская навука, 2007. – 442 с.
5. Возделывание голубики на торфяных выработках Припятского Полесья: (физиолого-биохимические аспекты развития) / Ж. А. Рупасова [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2016. – 242 с.
6. Клюква крупноплодная в Беларуси / Е. А. Сидорович [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 238 с.
7. Келети, Т. Основы ферментативной кинетики / Т. Келети. – М. : Мир, 1990. – 348 с.
8. Меньщикова, Е. Б. Антиоксиданты и ингибиторы радикальных окислительных процессов / Е. Б. Меньщикова, Н. К. Зенков // Успехи совр. биологии. – 1993. – Т. 113, № 4. – С. 442–455.
9. Иванов, Б. Н. Восстановление кислорода в хлоропластах и аскорбатный цикл / Б. Н. Иванов // Биохимия. – 1998. – Т. 63, № 2. – С. 165–170.
10. Кротович, В. Л. Биохимия растений / В. Л. Кротович. – М. : Высшая школа, 1986. – 503 с.
11. Рубин, Б. А. Об изоферментах пероксидазы в клубнях картофеля / Б. А. Рубин, Е. В. Будилова // Доклады АН СССР. – 1970. – Т. 190, № 3. – 722 с.
12. Андреева, В. А. Фермент пероксидаза. Участие в защитном механизме растений / В. А. Андреева. – М. : Наука, 1988. – 129 с.
13. Диксон, М. Ферменты / М. Диксон, Э. Уэбб. – М. : Мир, 1988. – 515 с.
14. Медведев, С. С. Физиология растений : учеб. / С. С. Медведев. – СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та. – 2004. – 336 с.
15. Моргун, В. В. Экофизиологические и генетические аспекты адаптации культурных растений к глобальным изменениям климата / В. В. Моргун, Д. А. Киризий, Т. М. Шадчина // Физиология и биохимия культурных растений. – 2010. – Т. 42, № 1. – С. 3–23.
16. Формирование биохимического состава плодов видов семейства *Ericaceae* (Вересковые) при интродукции в условиях Беларуси / Ж. А. Рупасова [и др.] ; под ред. акад. В. И. Парфенова. – Минск : Беларуская навука, 2011. – 307 с.
17. Физиолого-биохимические основы применения микроклонального способа размножения голубики высокорослой для получения оздоровленного посадочного материала Ж. А. Рупасова [и др.] ; под ред. акад. В. Н. Решетникова. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 185 с.
18. Методы определения сухих веществ или влаги : ГОСТ 28561-90. – Введ. 01.07.1991. – М. : Стандартиформ, 1991. – 11 с.
19. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 430 с.
20. Марсов, Н. Г. Фитохимическое изучение и биологическая активность брусники, клюквы и черники / Н. Г. Марсов : дис. ... канд. фарм. наук. – Пермь, 2006. – С. 99–101.
21. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы : учеб. пособие / сост. М. Г. Кусакина, В. И. Суворов, Л. А. Чудинова ; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2012. – 148 с.
22. Технохимический контроль консервного производства / А. Т. Марх [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1989. – 304 с.
23. Swain, T. The phenolic constituents of *Prunus Domestica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents / T. Swain, W. Hillis // J. Sci. Food Agric. – 1959. – Vol. 10, № 1. – P. 63–68. doi:10.1002/JSFA.2740100110
24. Скорикова, Ю. Г. Методика определения антоцианов в плодах и ягодах / Ю. Г. Скорикова, Э. А. Шафтан // Тр. 3-го Всесоюз. семинара по биологически активным (лечебным) веществам плодов и ягод. – Свердловск, 1968. – С. 451–461.
25. Методика определения антоцианов в плодах аронии черноплодной / В. Ю. Андреев [и др.] // Фармация. – 2013. – № 3. – С. 19–21.
26. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье // Государственная фармакопея СССР. – М. : Медицина, 1987. – Вып. 1 : Общие методы анализа. – С. 286–287.
27. Антиоксидантная активность белков отдельных видов дикорастущих растений Беларуси и Монголии / В. И. Домаш [и др.] // Ботаника (исследования) : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперимент. бот. – Минск, 2017. – Вып. 46. – С. 190–200.
28. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx* (Roxb.) Merr and Perry buds / Nguyen Thi Dung [et al.] // Food and chemical toxicology. – 2008. – Vol. 46, № 12. – P. 3632–3639. doi:10.1016/j.fct.2008.09.013
29. Физиологические и биохимические методы анализа растений : практикум / Калинингр. гос. ун-т ; авт.-сост. Г. Н. Чупахина. – Калининград : Калинингр. гос. ун-т, 2000. – 59 с.
30. Кинетические, биохимические и биологические методы анализа : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине специализации «Кинетические, биохимические и биологические методы анализа» для студентов специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия» / Курганский гос. ун-т, каф. «Физическая и прикладная химия» ; сост. Л. В. Мостальгина. – Курган, 2016. – 30 с.
31. Большой практикум по биоэкологии : учеб. пособие / О. Л. Воскресенская [и др.]. – Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т. – 2006. – Ч. 1. – 107 с.
32. Способ ранжирования таксонов растения : пат. ВУ 17648 / Ж. А. Рупасова, В. Н. Решетников, А. П. Яковлев. – Опубл. 30.10.13.
33. Макаревич, А. М. Антиоксидантная активность плодов *Vaccinium corymbosum* L. и *Vaccinium uliginosum* L. / А. М. Макаревич, В. Н. Решетников // Доклады НАН Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 5. – С. 76–80.

References

1. Prida A. I., Ivanova R. I. *Prirodnye antioksidanty polifenolnoj prirody (antiradikal'nye svoystva i perspektivy ispol'zovaniya)* [Natural antioxidants of polyphenolic nature (antiradical properties and prospects for use)]. *Pishchevye ingredienty. Syre i dobavki = Food Ingredients. Raw Materials and Additives*, 2004, no. 2, pp. 76–78. (in Russian)
2. Ryzhikova M. A., Farkhutdinova R. R., Sibiryak S. V., Zagudillin Sh. Z. *Vliyaniye vodnykh izvlecheniy iz lekarstvennykh rasteniy na processy svobodno-radikal'nogo okisleniya* [The influence of aqueous extracts from medicinal plants on the processes of free radical oxidation]. *Ekspierimental'naya i klinicheskaya farmakologiya = Experimental and Clinical Pharmacology*, 1999, vol. 62, no. 2, pp. 36–38. (in Russian)
3. Karabanov I. A. *Flavonoidy v mire rasteniy* [Flavonoids in the plant world]. Minsk, Uraiai Publ., 1981, 80 p. (in Russian)
4. Rupasova Zh. A., Reshetnikov V. N., Ruban N. N., Ignatenko V. A., Yakovlev A. P., Pyatnitsa F. S. *Golubika vysokoroslava. Ocenka adaptatsionnogo potentsiala pri introdukcii v usloviyakh Belarusi* [Highbush blueberry. Assessment of adaptation potential during introduction in the conditions of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2007, 442 p. (in Russian)
5. Rupasova Zh. A., Yakovlev A. P., Reshetnikov V. N., Lishtvan I. I., Vasilevskaya T. I., Krinitskaya N. B. *Vozdelyvaniye golubiki na torfyanykh vyrabotkakh Pripyatskogo Poles'ya: (fiziologo-biohimicheskie aspekty razvitiya)* [Cultivation of blueberries in peat workings of Pripyat Polesie: (physiological and biochemical aspects of development)]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2016, 242 p. (in Russian)
6. Sydorovich E. A., Kudynov M. A., Ruban N. N., Sherstenyukina A. V., Rupasova Z. A., Shapiro D. K., Horlenko S. V., Yurkevich I. D. *Klyukva krupnoplodnaya v Belarusi* [Large-fruited cranberries in Belarus]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1987, 238 p. (in Russian)
7. Keleti T. *Osnovy fermentativnoy kinetiki* [Fundamentals of enzymatic kinetics]. Moscow, Mir Publ., 1990, 348 p. (in Russian)
8. Menytsikova E. B., Zenkov N. K. *Antioksidanty i inhibitory radikal'nykh oksidativnykh processov* [Antioxidants and inhibitors of radical oxidative processes]. *Uspekhi sovremennoy biologii = The Successes of Modern Biology*, 1993, vol. 113, no. 4, pp. 442–455. (in Russian)
9. Ivanov B. *Vosstanovleniye kisloroda v hloroplastakh i askorbatnyytsikl* [Reduction of oxygen in chloroplasts and the ascorbate cycle]. *Biohimiya = Biochemistry*, 1998, vol. 63, no. 2, pp. 165–170. (in Russian)
10. Kretovich V. L. *Biohimiya rasteniy* [Biochemistry of plants]. Moscow, Higher School Publ., 1986, 503 p. (in Russian)
11. Rubin B. A., Budilova E. V. *Ob izofermentakh peroksidazy v klubnyakh kartofelya* [About peroxidase isoenzymes in potato tubers]. *Doklady AN SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1970, vol. 190, no. 3, 722 p. (in Russian)
12. Andreeva V. A. *Ferment peroksidaza. Uchastie v zashchitnom mekhanizme rasteniy* [Peroxidase enzyme. Participation in the defense mechanism of plants]. Moscow, Science Publ., 1988, 129 p. (in Russian)
13. Dixon M., Webb E. *Fermenty* [Enzymes]. Moscow, Mir Publ., 1988, 515 p. (in Russian)
14. Medvedev S. S. *Fiziologiya rasteniy: uchebnyk* [Plant physiology: textbook]. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2004, 336 p. (in Russian)
15. Morgun V. V., Kiriziy D. A., Shadchina T. M. *Ekofiziologicheskie i geneticheskie aspekty adaptatsii kul'turnykh rasteniy k global'nykh izmeneniyam klimata* [Ecophysiological and genetic aspects of adaptation of cultivated plants to global climate change]. *Fiziologiya i biohimiya kul'turnykh rasteniy = Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*, 2010, vol. 42, no. 1, pp. 3–23. (in Russian)
16. Rupasova Zh. A., Reshetnikov V. N., Vasilevskaya T. I., Yakovlev A. P., Pavlovsky N. B., Parfenov V. I. *Formirovaniye biohimicheskoy sostava plodov vidov semeystva Ericaceae (Vereskovye) pri introdukcii v usloviyakh Belarusi* [Formation of the biochemical composition of fruits of species of the family Ericaceae (Heathers) during introduction in the conditions of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2011, 307 p. (in Russian)
17. Rupasova Zh. A., Chizhik O. V., Reshetnikov V. N., Kutas E. N., Vasilevskaya T. I., Kurlovich T. V., Krinitskaya N. B., Zadalya V. S., Yuhimuk A. N., Drozd O. V., Pavlovskaya A. G., Goncharova L. V. *Fiziologo-biohimicheskie osnovy primeneniya mikroklonal'nogo sposoba razmnnozheniya golubiki vysokorosloy dlya polucheniya ozdorovlennogo posadochnogo materiala* [Physiological and biochemical bases of the application of the microclonal method of reproduction of tall blueberries to obtain healthy planting material]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2022, 185 p. (in Russian)
18. GOST 28561-90-1991. [State Standard 28561-90-1991. Methods for determining dry substances or moisture]. Moscow, Standartinform Publ., 1991, 11 p. (in Russian)
19. Ermakov A. I., Arasimovich V. V., Yarosh N. P. *Metody biohimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad, Agropromizdat Publ., Leningrad branch, 1987, 430 p. (in Russian)
20. Marsov N. G. *Fitohimicheskoye izuchenie i biologicheskaya aktivnost' brusniki, klyukvy i cherniki* [Phytochemical study and biological activity of cranberries, cranberries and blueberries]. Perm, 2006, pp. 99–101. (in Russian)
21. Kusakina M. G., Suvorov V. I., Chudinova L. A. *Bol'shoj praktikum "Biohimiya": laboratornye raboty* [Large workshop "Biochemistry": laboratory work]. Perm, 2012, 148 p. (in Russian)
22. Markh A. T., Zykina T. F., Golubev V. N. *Tekhnokhimicheskij kontrol' konservnogo proizvodstva* [Technochemical control of canning production]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989, 304 p. (in Russian)
23. Swain T., Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus Domestica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents. *J. Sci. Food Agric.*, 1959, vol. 10, no. 1, pp. 63–68. doi:10.1002/JSFA.2740100110
24. Skorikova Yu. G., Shaftan E. A. *Metodika opredeleniya antocianov v plodakh i yagodakh* [The method of determining anthocyanins in fruits and berries]. *Trudy 3-go Vsesoyuz. seminar po biologicheski aktivnym (lechebnym) veshchestvam plodov i yagod* [Proc. of the 3rd All-Union seminar on biologically active (medicinal) substances of fruits and berries]. Sverdlovsk, 1968, pp. 451–461. (in Russian)
25. Andreev V. Yu., Kalinkina G. I., Kolomiets N. E., Isaikina N. V. *Metodika opredeleniya antocianov v plodakh aronii chernoplodnoy* [The method of determining anthocyanins in the fruits of aronia prunifera]. *Farmatsiya = Pharmacy*, 2013, pp. 19–21. (in Russian)

26. *Opređenje soderzhaniya dubil'nyh veshchestv v lekarstvennom rastitel'nom syr'e* [Determination of the content of tannins in medicinal plant raw materials]. *Gosudarstvennaya farmakopeya SSSR = The State Pharmacopoeia of the USSR*. Moscow, 1987, vol. 1, pp. 286–287. (in Russian)
27. Domash V. I., Ivanov O. A. *Antioksidantnaya aktivnost' belkov ot del'nykh vidov dikorastushchikh rasteniy Belarusi i Mongolii* [Antioxidant activity of proteins of certain species of wild plants of Belarus and Mongolia]. *Botanika (issledovaniya) = Botany (Research)*. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Experimental Botany. Minsk, 2017, no. 46, pp. 190–200. (in Russian)
28. Nguyen Thi Dung, Jung Min Kim, Sun Chul Kang. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx* (Roxb.) Merr and Perry buds. *Food and chemical toxicology*, 2008, vol. 46, no. 12, pp. 3632–3639. doi:10.1016/j.fct.2008.09.013
29. Chupakhina G. N. *Fiziologicheskie i biohimicheskie metody analiza rasteniy* [Physiological and biochemical methods of plant analysis]. Kaliningrad, Kaliningrad University Publ, 2000, 59 p. (in Russian)
30. Mostaligina L. V. *Kineticheskie, biohimicheskie i biologicheskie metody analiza: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po discipline specializatsii "Kineticheskie, biohimicheskie i biologicheskie metody analiza" dlya studentov special'nosti 04.05.01 "Fundamental'naya i prikladnaya himiya"* [Kinetic, biochemical and biological methods of analysis: methodological guidelines for the performance of laboratory work in the discipline of specialization "Kinetic, biochemical and biological methods of analysis" for students of the specialty 04.05.01 "Fundamental and applied Chemistry"]. Kurgan State University, Department of Physical and Applied Chemistry. "Physical and Applied Chemistry", 2016, 30 p. (in Russian)
31. Voskresenskaya O. L., Alyabisheva E. A., Polovnikova M. G. *Bol'shoy praktikum po bioekologii: ucheb. posobie* [A large workshop on bioecology. Part 1: studies. stipend]. Yoshkar-Ola, Mari State University, 2006, ch. 1, 107 p. (in Russian)
32. Rupasova Zh. A., Reshetnikov V. N., Yakovlev A. P. *Sposob ranzhirovaniya taksonov rasteniy* [The method of ranking plant taxa]. Patent BY, no. 17648, 2013. (in Russian)
33. Makarevich A. M., Reshetnikov V. N. *Antioksidantnaya aktivnost' plodov Vaccinium corymbosum L. i Vaccinium uliginosum L.* [Antioxidant activity of *Vaccinium corymbosum* L. and *Vaccinium uliginosum* L. fruits]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2011, vol. 55, no. 5, pp. 76–80. (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

Добрянская Ксения Андреевна – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: K.dobryanskaya01@gmail.com

Павловский Николай Болеславович – кандидат биологических наук, заведующий отраслевой лабораторией интродукции и технологии ягодных растений, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Дрозд Ольга Владимировна – научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: Drozd_OlgaW@rambler.ru

Сулим Дарья Олеговна – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: sulimdaria@gmail.com

Авраменко Станислав Николаевич – младший научный сотрудник лаборатории химии растений ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: auramekastas@gmail.com

Information about the authors

Zhanna A. Rupasova – D. Sc. (Biology), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Chief Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Sarganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Ksenia A. Dobryanskaya – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Sarganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: K.dobryanskaya01@gmail.com

Nikolai B. Pavlovsky – Ph. D. (Biology), Head of the Industrial Laboratory of Introduction and Technology of Berry Plants, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Sarganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Olga V. Drozd – Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Sarganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: Drozd_OlgaW@rambler.ru

Daria O. Sulim – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Sarganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: sulimdaria@gmail.com

Stanislav N. Avramenko – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (2v, Sarganova Str., 220012, Minsk, Belarus). E-mail: auramekastas@gmail.com

ЮБИЛЕИ
*JUBILEE***К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Г. А. КАМЫШЕНКО**
TO THE 70th ANNIVERSARY OF G. A. KAMYSHENKO

Галине Анатольевне Камышенко, кандидату технических наук, доценту, ученому секретарю Института природопользования НАН Беларуси, 19 мая исполнилось 70 лет. Научная и организационная деятельность Галины Анатольевны хорошо известна в Институте и за его пределами.

Математик по образованию, Г. А. Камышенко нашла призвание в природоведческих академических учреждениях, где работает почти полвека. В Институте природопользования НАН Беларуси Галина Анатольевна с 1990 г. Здесь она прошла путь от старшего инженера до ученого секретаря института (с 2007 г.). Основное направление ее научной деятельности – количественные методы в геоэкологии и агрометеорологии.



Значительную роль в становлении Г. А. Камышенко как ученого принадлежит доктору географических наук Г. И. Сачку. В лаборатории моделирования геосистем, возглавляемой Григорием Ивановичем, при активном участии Галины Анатольевны разработаны и реализованы оригинальные программные модули информационно-моделирующей системы «Биогеоценотическое разнообразие Беларуси». Впервые для Беларуси были получены типологически и территориально распределенные оценки первичной биопродуктивности, динамики растительного вещества и биогенного круговорота важнейших химических элементов для лесных, болотных, луговых и сельскохозяйственных экосистем. Итогом разработки современных методов, подходов и технологий оценки состояния геоэкосистем на разных уровнях их организации стал ряд совместных с Г. И. Сачком монографий: «Биогеоценотическое разнообразие Беларуси. Информационно-моделирующая система» (1996 г.); «Биогенный круговорот в геоэкосистемах Беларуси (модельный аспект)» (2004 г.). В 2003 г. Г. А. Камышенко успешно защитила кандидатскую диссертацию.

Разработанные компьютерные методы и оригинальные средства анализа данных позволили провести территориально-временной анализ изменчивости температурно-влажностного режима Беларуси; выполнить анализ факторов изменчивости продуктивности сельскохозяйственных культур, возделываемых в Беларуси; построить модель урожайности комплекса основных сельскохозяйственных культур Беларуси; оценить устойчивость урожайности сельскохозяйственных культур и эффективность использования агресурсного потенциала пахотных земель в условиях изменения климата. По материалам исследований опубликованы монографии «Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси» (2006 г., в соавторстве с Г. И. Сачком) и «Погодные условия Беларуси и урожайность сельскохозяйственных культур» (2013 г.).

По результатам исследований Галиной Анатольевной Камышенко самостоятельно и в соавторстве опубликовано более 155 научных работ, среди которых 5 монографий и 3 брошюры, более 60 статей в научных периодических журналах. Полученные результаты Галина Анатольевна стремится довести до практического применения: материалы по продуктивности и динамике запасов древостоев использованы при подготовке Первого национального сообщения Республики Беларусь; результаты исследований в области агрометеорологии внедрены в Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Республиканский гидрометеорологический центр и используются в учебном процессе на кафедре общего землеведения и гидрометеорологии географического факультета Белорусского государственного университета.

Новые грани таланта Г. А. Камышенко раскрылись с назначением ее на должность ученого секретаря института. Математический склад ума, дисциплинированность, высокая работоспособность и доброжелательность Галины Анатольевны позволили ей проявить себя способным организатором, знающим научные проблемы по тематике проводимых в институте научных исследований, умеющим

решать поставленные задачи, качественно и оперативно выполнять поручения руководства, в установленные сроки осуществлять контроль за выполнением постановлений Президиума НАН Беларуси и решений Отделения химии и наук о Земле.

С 2007 г. Г. А. Камышенко отвечает за научно-организационное сопровождение государственных программ научных исследований в области природопользования и охраны окружающей среды: «Природопользование» на 2006–2010 годы, «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» на 2011–2015 годы в части подпрограммы «Природно-ресурсный потенциал», программ «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы и «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы. Галина Анатольевна осуществляла деятельность по контролю и обеспечению эффективной реализации государственной комплексной целевой научно-технической программы «Природные ресурсы и экология» на 2011–2015 годы в пределах компетенции Национальной академии наук Беларуси.

Г. А. Камышенко является ученым секретарем Научного совета по государственной программе научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы, секретарем научно-технического совета по подпрограмме «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 годы и входит в состав редколлегии научного журнала «Природопользование».

Галина Анатольевна проводит большую работу по обеспечению послевузовского образовательного процесса в аспирантуре и докторантуре при Институте природопользования НАН Беларуси. Она щедро делится своими знаниями и опытом, помогая аспирантам решать проблемные вопросы. На протяжении многих лет Г. А. Камышенко осуществляла руководство производственной практикой студентов факультета естествознания УО «Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка».

Научные и организационные заслуги Галины Анатольевны были неоднократно отмечены руководством Института природопользования и Национальной академии наук Беларуси. Г. А. Камышенко награждена нагрудным знаком «Юбилейная медаль «У гонар 80-годдзя Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (2011 г.), Почетной грамотой Национальной академии наук Беларуси (2012 г.), Почетной грамотой Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь (2018 г.), Почетной грамотой Администрации Президента Республики Беларусь (2021 г.), памятным знаком «У гонар 100-годдзя Інстытута беларускай культуры» (2022 г.), ей объявлена Благодарность Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (2014 г.).

Юбилейную дату Галина Анатольевна встретила с оптимизмом и намерением продолжать трудовую деятельность, также как и путешествия по разным странам и континентам.

Коллеги и друзья искренне поздравляют Галину Анатольевну Камышенко с юбилеем и желают ей дальнейших творческих успехов, неиссякаемой энергии и новых ярких впечатлений.

**С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, А. В. Матвеев,
В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик**

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Природопользование» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию на белорусском или русском языках; шрифт – Arial, кегль – 10 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – одинарный. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

инициалы и фамилии авторов;

название статьи;

полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Затем метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен составлять 10–16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки, число которых не должно превышать 10. Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подписочные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – *русском (белорусском) и английском*.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

7. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падзяка»), «Acknowledgements».

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), звание, должность, место работы с указанием адреса, контактную информацию (e-mail, телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке или присылается по электронной почте в редакцию журнала – eco@nature-nas.by. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType.

Правила оформления статьи:

параметры страницы – формат A4; поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см (**страницы не нумеровать!**);

текст набирается шрифтом Arial, кегль 10;

межстрочный интервал – одинарный;

абзацный отступ – 10 мм.

Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C^2 , C_4) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать *курсивом*, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, C1) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word) после первого упоминания о них, а также даются в виде отдельных файлов в графическом формате (300 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статью, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно предоставлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде. **Таблицы** должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы. Следует **различать дефис «-» и тире «—»**. В тексте тире отделяется единичными пробелами, между цифрами и числами тире ставится без пробелов.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

Материалы для публикации следует направлять по адресу: ул. Ф. Скорины, 10, комн. 202, редакция журнала «Природопользование», 220076, г. Минск, Республика Беларусь, либо по электронной почте: eco@nature-nas.by. Тел. для справок: +375 17 325 84 55.

Научное издание
Scientific publication

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
NATURE MANAGEMENT

№ 1, 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 07.08.2024.	<i>Signed into print 07.08.2024.</i>
Формат 60×90/8. Бумага офсетная.	<i>60×90/8 format. Office paper.</i>
Гарнитура Ариал. Печать цифровая.	<i>Arial garniture. Digital print.</i>
Усл. печ. л. 23,3.	<i>Conditional printed sheets 23,3.</i>
Уч.-изд. л. 22,7.	<i>Conditional edited sheets 22,7.</i>
Тираж 100 экз.	<i>Circulation 100 copies.</i>
Заказ № 304.	<i>Order No. 304.</i>

Полиграфическое исполнение	<i>Polygraph execution</i>
Республиканское унитарное предприятие	<i>Republican unitary enterprise</i>
«Информационно-вычислительный центр	<i>«Information and Computer Centre</i>
Министерства финансов	<i>of the Ministry of Finance</i>
Республики Беларусь».	<i>of the Republic of Belarus».</i>
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014 г.	<i>Press license no. 02330/89 of 3 March 2014.</i>
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск	<i>Kalvarijskaya Str. 17, 220004, Minsk</i>