

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



1
2023

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларусь»

Природопользование

2023. № 1

Основан в 1996 г. как сборник научных трудов.
В 2018 г. преобразован в журнал.
Выходит 2 раза в год

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

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

Международный редакционный совет

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

Адрес

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



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

Nature Management

2023. № 1

Was founded in 1996 as a proceeding.
In 2018 was transformed into a journal.
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
Ivan Lishtvan – Academician, D. Sc. (Technical), 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)
Leszek 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., Хитриков М. А.	Квантильный анализ среднемесячных значений температуры и осадков по территории Беларуси	5
<i>Loginov V. F., Khitrykau M. A.</i>	<i>Quantile analysis of average monthly temperature and precipitation on the territory of Belarus</i>	
Коляда В. В.	Влияние изменения климата на динамику урожайности зерновых культур в регионах Беларуси	17
<i>Kalyada V. V.</i>	<i>The impact of climate change on dynamics yield of grain crops in regions of Belarus</i>	
Волчек А. А., Шпока Д. А.	Колебания максимальных уровней воды реки Припять	27
<i>Volchak A. A., Shpoka D. A.</i>	<i>Maximum water levels fluctuations of the Pripyat River</i>	
Суховило Н. Ю., Новик А. А.	Роль речных проток в формировании гидрохимического режима озер Национального парка «Браславские озера»	41
<i>Sukhovilo N. Y., Novik A. A.</i>	<i>Role of streams between lakes of Braslav Lakes National Park in formation of lakes hydrochemical regime</i>	
Савич-Шемет О. Г., Пашкевич В. И., Анцух Ю. П.	Естественные ресурсы подземных вод территории Беловежской пущи и их изменение под влиянием климатических факторов	54
<i>Savich-Shemet O. G., Pashkevich V. I., Antsukh Yu. P.</i>	<i>Natural groundwater resources of Bialowieza Forest's territory and their change under the influence of climatic factors</i>	
Бровка А. Г., Мурашко А. А., Агутин К. А.	Фазовый состав воды и теплофизические характеристики терригенных отложений в районе базирования белорусской антарктической станции	70
<i>Brovka A. G., Murashko A. A., Agutin K. A.</i>	<i>Water phase composition and thermophysical characteristics of terrigenous sediments in the area of the Belarusian Antarctic station</i>	
Мелех Д. В., Наркевич И. П.	Повышение методологического уровня расчета выбросов диоксида углерода от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута	84
<i>Melekh D. V., Narkevitch I. P.</i>	<i>Increasing the methodological tier of the calculation of carbon dioxide emissions from combustion of road transportation fuels and residual fuel oil</i>	
Галкин П. А.	Оценка и картографирование геоэкологических условий на территории крупного города (на примере Витебска)	93
<i>Galkin P. A.</i>	<i>Assessment and mapping of geoecological conditions on the territory of a large city (on the example of Vitebsk)</i>	
Ратникова О. Н., Лисицына И. П., Борш А. Т., Агейчик И. В.	Оценка нарушенности торфяников и эффективность их использования на примере Смолевичского района	113
<i>Ratnikova O. N., Lisitsyna I. P., Borsh A. T., Ageichik I. V.</i>	<i>Assessment of disturbance of the peatlands and efficiency their use on the basis of Smolevichi district</i>	

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

Матвеев А. В.	Современные геологические процессы на территории Белорусского Полесья	124
<i>Matveyev A. V.</i>	<i>Modern geological processes in the Belarusian Polesie area</i>	
Маевская А. Н., Богдасаров М. А., Шешко Н. Н.	Обоснование схем рационального использования залежей нерудного сырья Брестской области	135
<i>Mayevskaya A. N., Bahdasarau M. A., Sheshko N. N.</i>	<i>Substantiate of schemes for the rational use of deposits of non-metallic minerals of the Brest Region</i>	

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

Бровка Г. П., **Лиштван И. И.**, Повышение эффективности термохимической переработки горючих материалов методом пиролиза 173
Мурашко А. А., Дедюля И. В.,
Бровка А. Г., Агутин К. А.

Brovka G. P., Lishvan I. I., Improving the efficiency of thermochemical processing of combustible materials by pyrolysis method
Murashko A. A., Dedyulya I. V.,
Brovka A. G., Agutin K. A.

Лиштван И. И., Дударчик В. М., Утилизация полимерсодержащих отходов методом их катализитического пиролиза с торфом 181
Крайко В. М., Ануфриева Е. В.
Lishvan I. I., Dudarchyck V. M.,
Kraiko V. M., Anufrieva A. V.

Курзо Б. В., Кунцевич В. Б., Теоретические основы расчета и обоснование гидротранспорта сапропеля 187
Гайдукевич О. М., Макаренко Т. И.,
Агейчик И. В., Татков А. Ю.,
Калилец Л. П.
Kurzo B. V., Kuntsevich V. B.,
Gaidukevich O. M., Makarenko T. I.,
Ageichik I. V., Tatkov A. Yu., Kalilets L. P.

Томсон А. Э., Соколова Т. В., Влияние модифицирующих добавок на формирование пористой структуры 198
Царюк Т. Я., Марзан А. С.,
Фалюшина И. П., Ануфриева Е. В.,
Пехтерева В. С., Калантаров М. Г.
Thomson A. E., Sokolova T. V.,
Tsariuk T. Ya., Marzan A. S.,
Faliushina I. P., Anufrieva A. V.,
Pekhtereva V. S., Kalantarov M. G.

Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Состав и антимикробная активность спиртовых и эфирных экстрактов 206
Овчинникова Т. Ф., Семенчукова Е. А., сфагнового торфа и сфагнового мха
Муратова А. А.
Zhmakova N. A., Makarova N. L.,
Ovchinnikova T. F., Semenchukova E. A.,
Muratova A. A.

Рупасова Ж. А., Криницкая Н. Б., Влияние фунгицидных препаратов разной химической природы на 217
Сулим Д. О., Добрянская К. А., накопление гидроксикоричных кислот, пектиновых и дубильных веществ
Задаля В. С., Павловский Н. Б., в плодах *Vaccinium Corymbosum L.* в условиях Беларуси
Павловская А. Г., Коломиец Э. И.,
Алещенкова З. М.,
Мандрик-Литвинович М. Н.,
Лиштван И. И.
Rupasova Zh. A., Krinitskaya N. B.,
Sulim D. O., Dobryanskaya K. A.,
Zadalia V. S., Pavlovsky N. B.,
Pavlovskaya A. G., Kolomiets E. I.,
Aleshchenkova Z. M.,
Mandrik-Litvinkovich M. N.,
Lishvan I. I.

**ПАМЯТИ УЧЕНОГО
IN THE MEMORY OF A SCIENTIST**

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-5-16>

УДК 551.582.2

Поступила в редакцию 23.03.2023

Received 23.03.2023

КВАНТИЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ ПО ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведен анализ среднемесячной температуры воздуха и месячной суммы осадков с помощью метода квантильной регрессии. Рассматривались процентили, соответствующие выбранным экстремумам, т. е. ниже 0,1 и выше 0,9. Установлены особенности пространственной и временной изменчивости квантитей температуры воздуха для зимнего и летнего сезонов. Статистически значимая связь температуры воздуха с характеристиками подстилающей поверхности отмечается главным образом для квантитей 0,9 и выше. Пространственное распределение значений квантитей месячной суммы осадков более сложное и приблизительно отвечает сезонному среднему только для квантита 0,9. В то же время их временная изменчивость хорошо согласуется с характером современного потепления климата. Обнаружена статистически значимая зависимость месячных сумм осадков от орографии местности.

Ключевые слова: квантильная регрессия; среднемесячная температура воздуха; месячная сумма осадков; *t*-статистика Стьюдента.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Хитриков М. А., Квантильный анализ среднемесячных значений температуры и осадков по территории Беларуси // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 5–16.

QUANTILE ANALYSIS OF AVERAGE MONTHLY TEMPERATURE AND PRECIPITATION ON THE TERRITORY OF BELARUS

V. F. Loginov, M. A. Khitrykau

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

Abstract. Analysis of average monthly air temperature and monthly precipitation sums has been performed using quantile regression method. Percentiles corresponding with selected extremes, i. e. below 0.1 and above 0.9, were taken into consideration. Distribution and temporal variability of temperature quantiles were determined for winter and summer seasons. Statistically significant relation between air temperature and characteristics of underlying surface is observed mainly for quantile 0.9 above. Spatial distribution of quantiles of monthly precipitation sums is more complex and is close to seasonal average only for 0.9 quantile. At the same time, their temporal variability corresponds well with features of modern warming. Statistically significant relation between monthly precipitation sums and elevation above sea level was found.

Keywords: quantile regression; average monthly air temperature; monthly precipitation sum; *t*-statistic.

For citation. Loginov V. F., Khitrykau M. A. Quantile analysis of average monthly temperature and precipitation on the territory of Belarus. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 5–16.

Введение. Такая проблема, как изменчивость экстремумов метеорологических характеристик, на территории Беларуси слабо освещена в литературе, хотя она крайне важна для оценки климатообусловленных потерь в народном хозяйстве, поскольку без их учета полноценная адаптация к продолжающемуся потеплению климата просто невозможна.

В последние десятилетия был разработан ряд методик, позволяющих оценить поведение экстремумов величин; одним из таких методов является квантильная регрессия. Впервые она была предложена Р. Коэнекром и Г. Бассеттом в 1978 г. [1] и изначально разрабатывалась для эконометрических оценок. Однако данный метод хорошо показал себя при описании изменчивости значений метеорологических характеристик, находящихся в областях $0,25 < \sigma > 0,75$ [2–7]. Квантильная регрессия позволяет оценить тенденции изменчивости экстремумов рассматриваемых величин и на этой основе разработать их прогноз.

Методы и данные исследования. Квантильная регрессия представляет собой «расширенный вариант» обычной линейной регрессии, результатом которого являются зависимости вида $y = ax + b$ для значений, лежащих выше или ниже определенного квантиля (процентиля); линейная регрессия в данном случае представляет собой частный вид квантильной, при котором рассчитывается зависимость для квантиля 0,5 [8]. Построение зависимостей для каждого квантиля осуществляется путем решения задачи линейного программирования, которая по своей сути совпадает с задачей квантильной регрессии [7].

В настоящей работе проведен анализ среднемесячных значений температуры воздуха на высоте 2 м и количества осадков за период с 1955 по 2021 г. с помощью инструментария языка программирования Python (библиотека statsmodels) [9, 10]. Для анализа изначально планировалось рассматривать квантили (процентили) 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,9, 0,95, 0,98 и 0,99, однако в случае среднемесячных значений ошибки, возникающие при итерации продолжительных рядов данных, привели к тому, что значения коэффициента a для квантилей меньших, чем 0,05, и больших, чем 0,95, зачастую при повышении процентильного порога значения квантиля снижаются, либо растут при понижении процентильного порога. Из-за данной особенности основное внимание при анализе было уделено квантилям 0,05, 0,1 и 0,9. Исключением являются значения среднемесячной температуры за весь рассматриваемый период, где отклонения, отмеченные ранее, оказались свойственными только квантилям 0,98 и 0,99.

В связи с тем, что период 1955–2021 гг. охватывает период современного потепления и предшествующие ему десятилетия, был осуществлен расчет квантильной регрессии значений температуры и количества осадков за период 1955–1987 гг. (десятилетия, предшествовавшие современному потеплению) и 1988–2021 гг. (эпоха современного потепления климата) с целью оценить влияние изменений климата на поведение экстремумов среднемесячных значений температуры и осадков. Подобное деление основано на материалах работ В. Ф. Логинова и др. [11–14], в которых обосновывается, что на территории Беларуси современное потепление климата началось именно с 1988 г.

Анализ проводили для всех действующих метеорологических станций Беларуси, имеющих ряды данных достаточной продолжительности без больших и (или) регулярных пропусков. Таким образом, из рассмотрения были исключены станции Мстиславль, Нарочь и Брагин. Источником данных являлись электронные архивы Белгидромета [15]. Оказалось, что данные за весь рассматриваемый период (1955–2021 гг.) доступны лишь для ограниченного числа станций, таких как Барановичи, Бобруйск, Борисов, Брест, Василевичи, Верхнедвинск, Витебск, Волковыск, Гомель, Горки, Гродно, Житковичи, Жлобин, Лепель, Лида, Марьина Горка, Минск, Могилёв, Новогрудок, Пинск, Полоцк, Пружаны, Славгород и Шарковщина; для остальных станций данные доступны лишь с 1977 г. Таким образом при расчете квантильной регрессии для периода 1955–1987 гг. и при сравнении значений квантилей между периодами использовали ограниченный вышеназванный набор станций.

Для построения карт пространственного распределения значений квантилей использовали программный пакет QGIS [16].

Результаты и их обсуждение. На основании расчетов квантильной регрессии были построены карты пространственного распределения значений коэффициента a рассматриваемых процентилей за весь период 1955–2021 гг., а также карты распределения разностей значений квантилей между периодами 1988–2021 и 1955–1987 гг., представленные на рис. 1–4.

Очевидно, что квантили 0,05 и 0,1 среднемесячной температуры воздуха будут характеризовать условия зимнего сезона, а квантиль 0,9 – летнего. С этим связана и главная особенность пространственного распределения значений квантилей: градиент температур для процентилей 0,05 и 0,1 направлен с северо-востока на юго-запад, а для процента 0,9 – с северо-запада на юго-восток. Эта особенность прослеживается для всего рассматриваемого периода, однако ярче всего она проявляется в период современного потепления климата (с 1988 г.); этому способствовало большее число рассматриваемых станций. Характер пространственного распределения значений квантилей в период 1955–1987 гг. несколько отличается: изотермы приобретают квазимеридиональный характер, особенно в холодный период года. Вероятная причина этого связана с тем, что в предыдущий период континентальность климата была более выражена. Потепление климата способствовало уменьшению континентальности климата в Беларуси, однако этот эффект менее выражен в теплый период года [13, 14, 17].

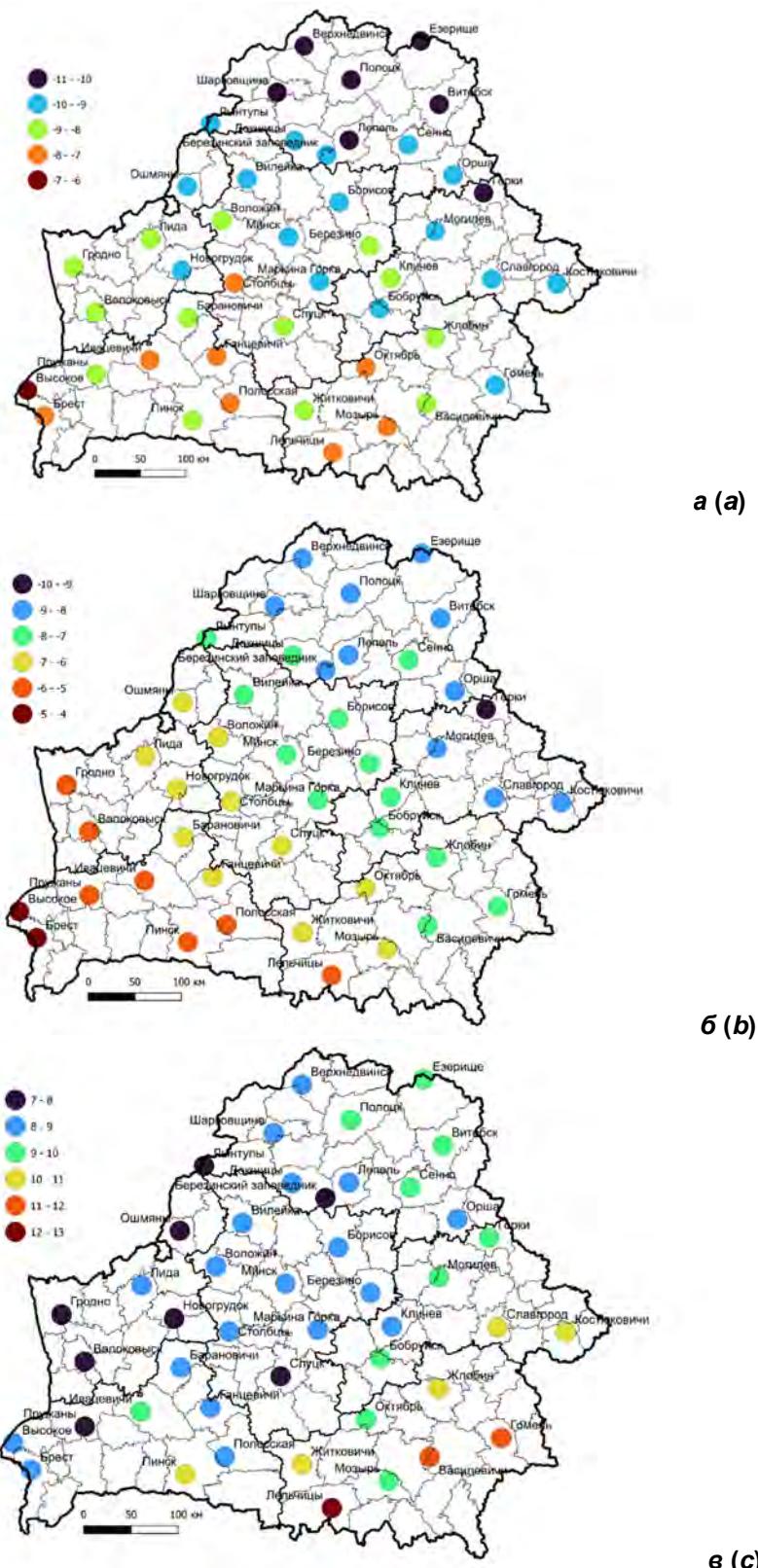


Рис. 1. Значения квантилей 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,9 (в) среднемесячной температуры воздуха по территории Беларусь за период 1955–2021 гг., °С

Fig. 1. Values of 0.05 (a), 0.1 (b) and 0.9 (c) quantiles of average monthly temperature on the territory of Belarus over the period 1955–2021, °C

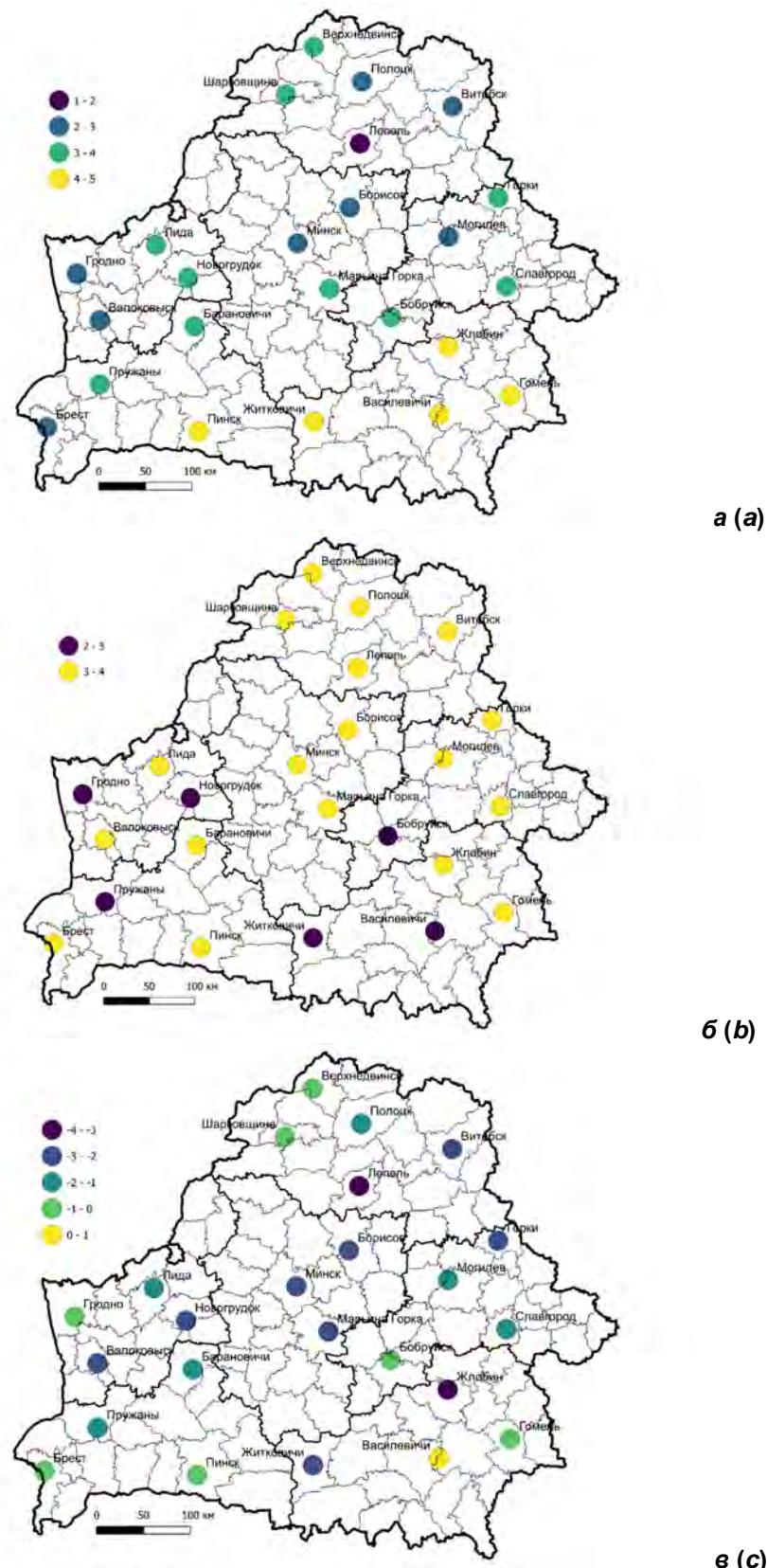


Рис. 2. Разность значений квантилей 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,9 (в) среднемесячной температуры воздуха по территории Беларусь между периодами 1988–2021 и 1955–1987 гг., °C

Fig. 2. Differences in values of 0.05 (a), 0.1 (b) and 0.9 (c) quantiles of average monthly temperature on the territory of Belarus between 1988–2021 and 1955–1987 periods, °C

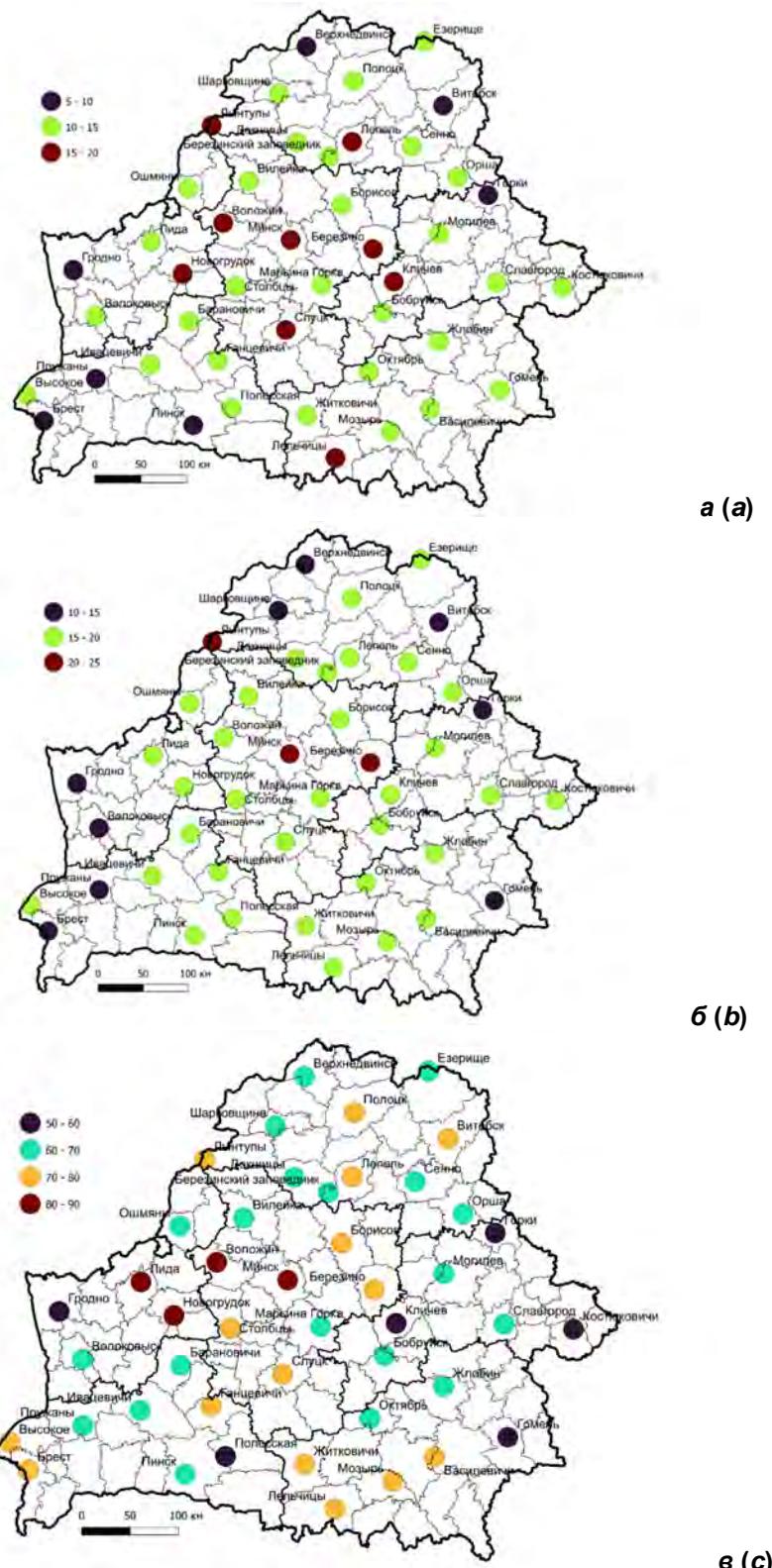


Рис. 3. Значения квантилей 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,9 (в) среднемесячного количества осадков по территории Беларусь за период 1955–2021 гг., мм

Fig. 3. Values of 0.05 (a), 0.1 (b) and 0.9 (c) quantiles of monthly precipitation sums on the territory of Belarus over the period 1955–2021, mm

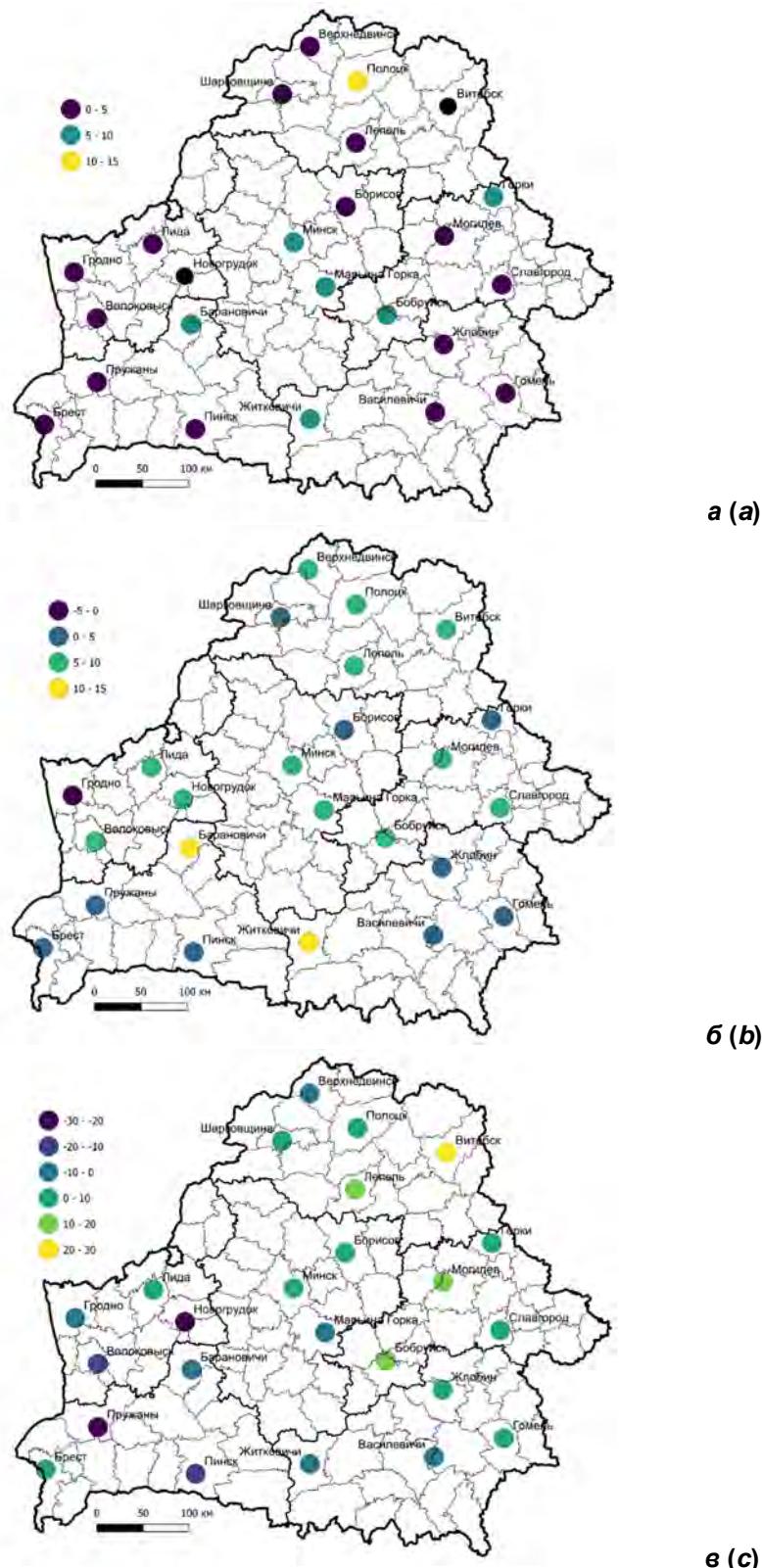


Рис. 4. Разность значений квантилей 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,9 (в) среднемесячного количества осадков по территории Беларуси между периодами 1988–2021 и 1955–1987 гг., мм

Fig. 4. Differences in values of 0.05 (a), 0.1 (b) and 0.9 (c) quantiles of monthly precipitation sums on the territory of Belarus between 1988–2021 and 1955–1987 periods, mm

Пространственное распределение значений квантилей 0,05 и 0,1 характеризуется малым количеством каких-либо локальных экстремумов, чего нельзя сказать о распределении значений квантиля 0,9. В этом случае можно выделить ряд аномалий, которые объясняются влиянием антропогенных или природных факторов (характеристик подстилающей поверхности). Например, высокие значения температуры для станции Сенно, сравнимые со средними для Гомельской области и смежных с ней районов. Причина этого обусловлена расположением пункта наблюдений в относительной близости от центра города и многоэтажной жилой застройки, вследствие чего проявляется эффект городского острова тепла, чаще характерного для более крупных городов, население которых составляет 100 тыс. человек и более.

Из природных факторов, способных влиять на характер пространственного распределения значений квантилей, ведущими являются следующие: орография (высота над уровнем моря), лесистость территории, ее заболоченность и доля мелиорированных земель в общей площади рассматриваемой территории. На рис. 5–8 представлены физическая карта территории Беларуси, а также доля лесов, болот и мелиорированных земель в общей площади районов или обрабатываемых земель в районе [18]. Достоверность зависимостей между значениями квантилей и характеристиками упомянутых природных факторов была проверена с помощью *t*-статистики Стьюдента. Выяснилось, что для квантиля 0,9 значимыми факторами являются высота над уровнем моря и заболоченность территории; для квантиля 0,95 значимая зависимость наблюдается с показателем лесистости территории. Для периода 1955–1987 гг. не наблюдается ни одной значимой зависимости от данных факторов, а для периода 1988–2021 гг. значимая зависимость свойственна только с показателем высоты над уровнем моря как для квантиля 0,9, так и для квантиля 0,1.

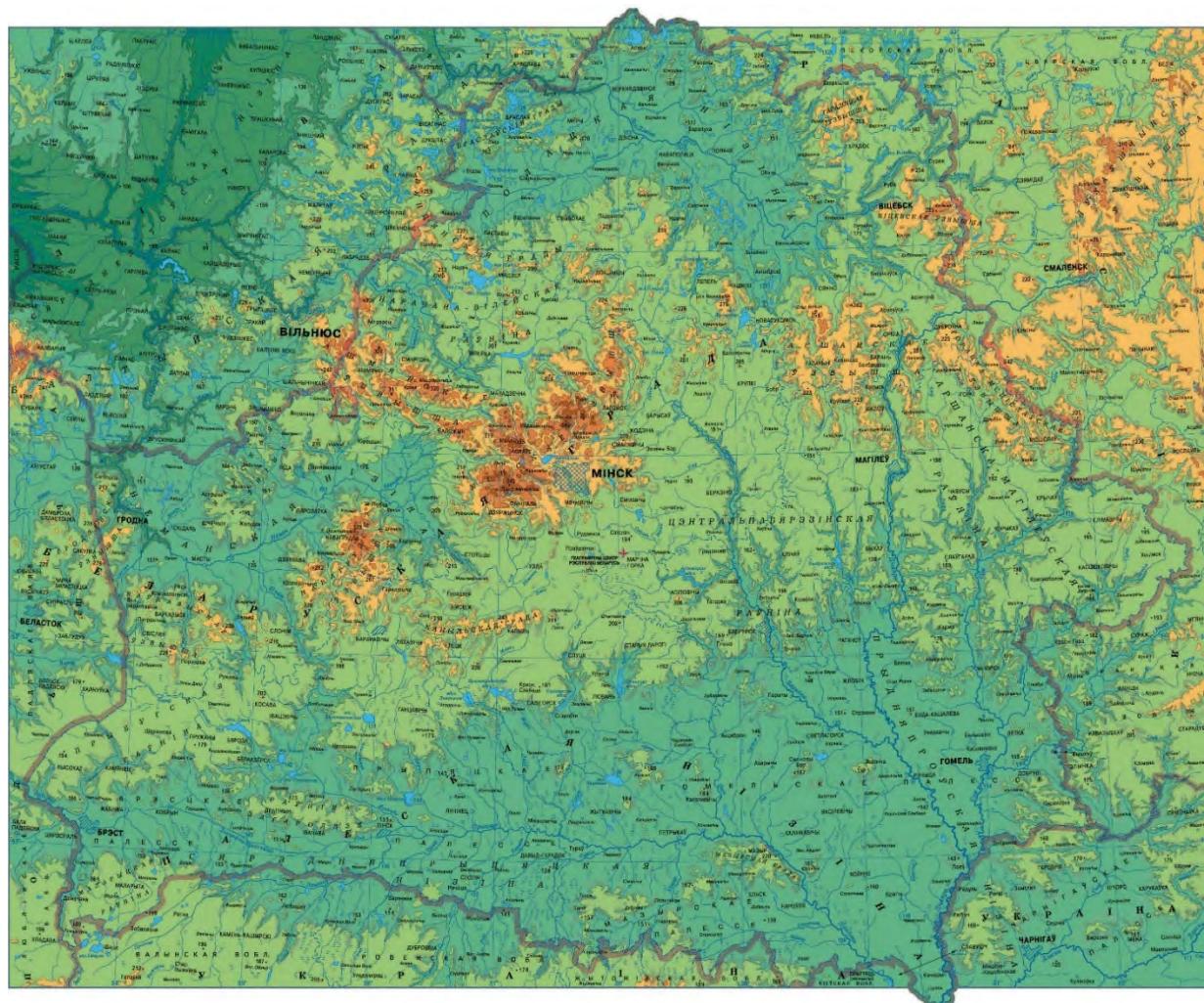


Рис. 5. Физическая карта территории Беларуси [18]

Fig. 5. Physical map of the territory of Belarus [18]

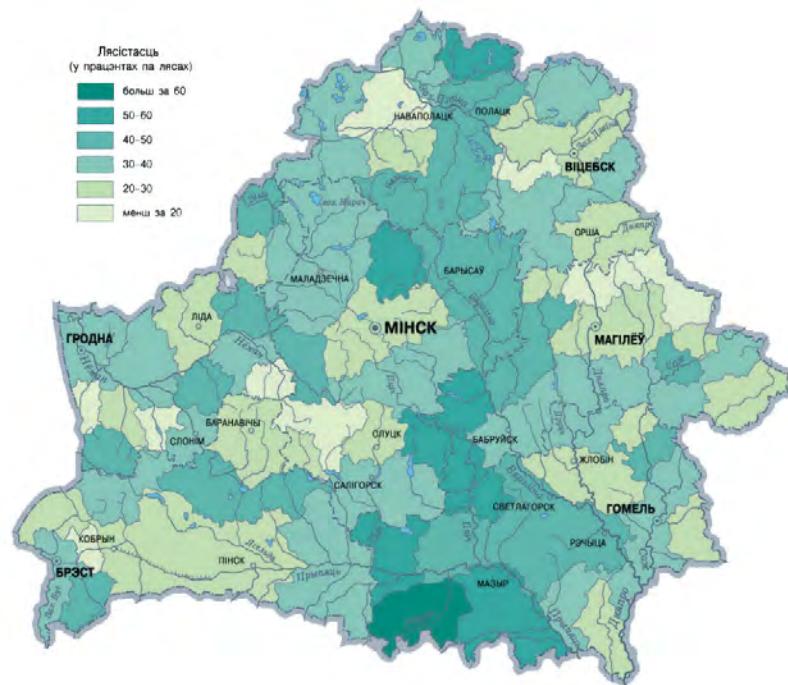


Рис. 6. Средняя лесистость по административным районам Беларуси, % [18]

Fig. 6. Average forest cover for administrative districts of Belarus, % [18]

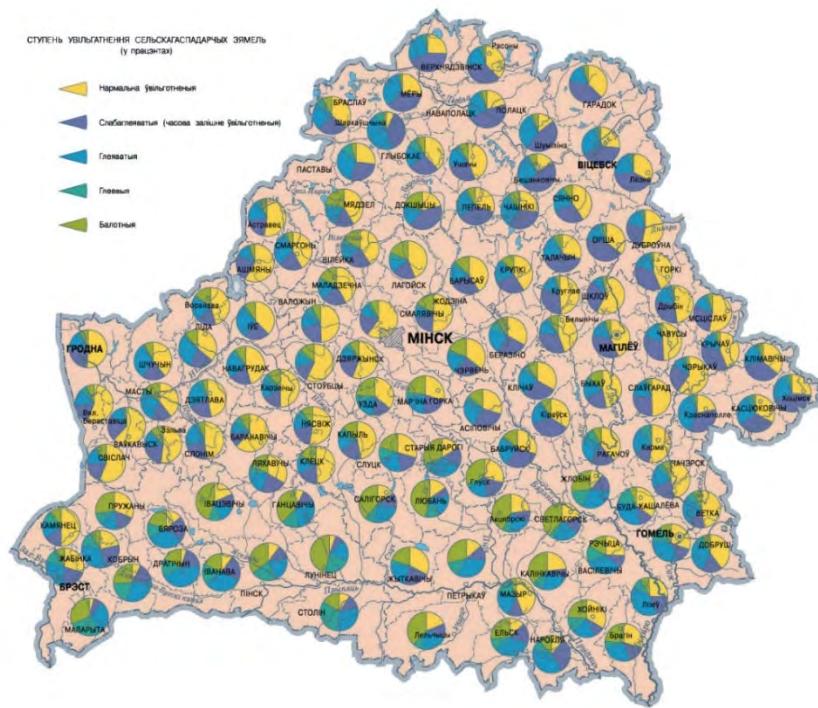


Рис. 7 Степень увлажненности сельскохозяйственных земель по административным районам Беларуси [18]

Fig. 7. Soil moisture levels of agricultural lands for administrative districts of Belarus [18]

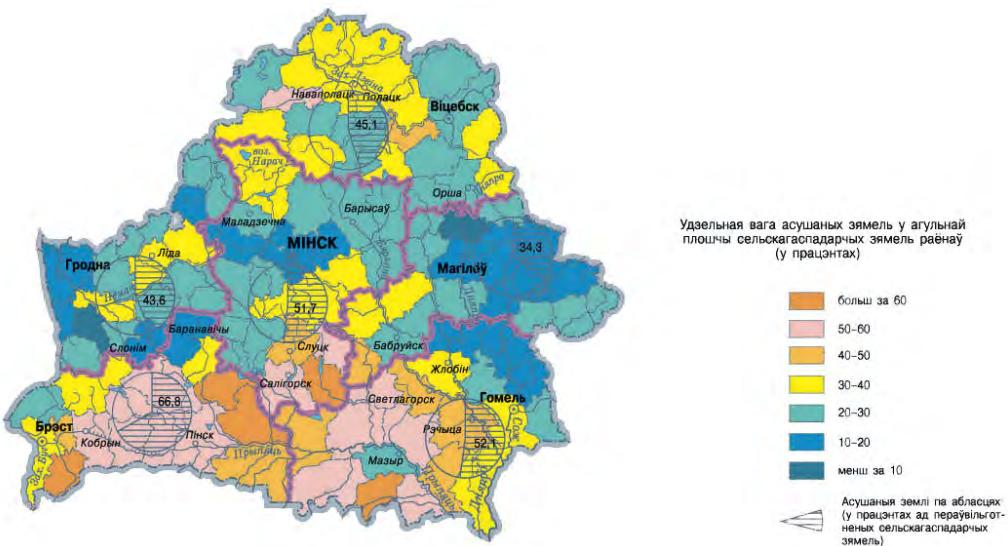


Рис. 8. Удельный вес осушенных земель в общей площади сельскохозяйственных угодий по административным районам Беларуси, % [18]

Fig. 8. Fraction of drained lands in total area of agricultural lands for administrative districts of Belarus, % [18]

Таблица 1. Табличные и наблюдаемые значения t -критерия Стьюдента для связи характеристик подстилающей поверхности со значениями квантилей среднемесячной температуры воздуха

Table 1. Tabular and observed t -values for relation between underlying surface characteristics and average monthly air temperature

Квантиль	$T_{\text{табл.}}$	$T_{\text{набл.}}(\text{ВНУМ})$	$T_{\text{набл.}}(\text{лес.})$	$T_{\text{набл.}}(\text{забол.})$	$T_{\text{набл.}}(\text{мелиор.})$
Период 1955–2021 гг.					
$q = 0,01$	2,0167	1,3764	0,8649	1,7671	1,0039
$q = 0,02$	2,0167	0,0927	1,2943	0,5963	0,8802
$q = 0,05$	2,0167	1,5698	0,0927	0,7926	1,1393
$q = 0,1$	2,0167	1,2544	0,4554	0,8726	0,9392
$q = 0,9$	2,0167	2,9929	1,4837	2,2805	0,3283
$q = 0,95$	2,0211	1,8574	2,0646	0,2901	0,179
Период 1955–1987 гг.					
$q = 0,05$	2,0739	0,0663	0,0663	0,0663	0,8135
$q = 0,1$	2,0739	0,9735	0,1241	0,8624	0,2616
$q = 0,9$	2,0739	1,4130	0,8919	0,1049	0,4808
Период 1988–2021 гг.					
$q = 0,05$	2,0167	1,9350	0,8878	1,3472	1,5201
$q = 0,1$	2,0167	2,3603	0,6422	1,4350	1,2340
$q = 0,9$	2,0167	3,7082	1,9870	1,3593	0,6214

П р и м е ч а н и е: ВНУМ – высота над уровнем моря; лес. – лесистость территории; забол. – заболоченность территории; мелиор. – мелиорированность территории.

Н о т е. ВНУМ – elevation above sea level; лес. – forest cover percentage; забол. – swamp cover percentage; мелиор. – fraction of meliorated lands.

Представленные результаты несколько противоречивы за счет как использования усеченного набора данных за период 1955–1987 гг., так и некоторого искажающего влияния изменений свойств подстилающей поверхности в результате потепления климата, а также антропогенной деятельности.

Самой заметной особенностью является характер изменений значений квантилей в 1988–2021 гг. по сравнению с периодом 1955–1987 гг. Из рис. 2 следует, что значения квантилей, характеризующие зимний сезон, увеличились в среднем на 2–3 °C, и наибольшие изменения произошли на юге страны, о чем свидетельствуют изменения значений квантиля 0,05. Это не противоречит установленным ранее изменениям температуры в холодный период года на территории Беларуси [11, 13, 14]. Произошло уменьшение значений квантиля 0,9 в среднем на 2 °C почти на всех станциях. Исключение составляет станция Василевичи, где обнаружен незначительный прирост. Принимая во внимание рост

температуры, объяснить этот результат можно только техническими причинами, такими как перенос станций, застройка прилегающей территории, пропуски данных наблюдений и т. д.

Рассмотрим изменения значений квантилей для показателя месячной суммы осадков. В отличие от температуры в этом случае нельзя утверждать, что какой-либо квантиль характеризует определенный сезон года, хотя в среднем наименьшее количество осадков в Беларуси выпадает в зимне-весенний период, а наибольшее – летом. Тем не менее периоды засухи и обильных осадков могут приходить на любой сезон года. Это значит, что квантили месячной суммы осадков будут усредненными характеристиками.

Как и в случае со среднемесячной температурой, пространственное распределение значений квантилей месячной суммы температур во многом повторяет общий характер распределения осадков по территории Беларуси: на западе, востоке и юго-востоке страны количество осадков, как правило, ниже среднего, а в центральной части страны и на ее севере – выше. Это особенно прослеживается для квантиля 0,9. Распределение значений квантилей 0,05 и 0,1 относительно равномерно: амплитуда количества осадков для них невелика, и поэтому сложно выделить какие-либо аномалии в характере распределения. Данную особенность можно объяснить тем, что формирование условий дефицита осадков на территории Беларуси связано с действием крупномасштабных атмосферных образований, главным образом блокирующих антициклонов, площадь которых во много раз превышает общую площадь страны. Единственной относительно заметной аномалией в распределении значений квантилей является только станция Житковичи, которая в силу своего расположения получает большее количество осадков, чем соседние, даже в относительно засушливые месяцы [10, 17].

Пространственное распределение значений квантилей месячной суммы осадков характеризуется отсутствием какого-либо градиента, но при этом в нем выразительно просматривается влияние ранее упомянутых характеристик подстилающей поверхности, в особенности рельефа. Достоверность зависимостей между значениями квантилей месячной суммы осадков и высотой над уровнем моря, а также долей лесов, болот и мелиорированных земель в общей площади района была проверена с помощью *t*-статистики Стьюдента. Выяснилось, что значимая зависимость с высотой над уровнем моря свойственна квантилям 0,1 и 0,9; для периода 1955–1987 гг. она заметна лишь для квантиля 0,9, а для эпохи современного потепления – и для квантиля 0,05. Кроме того, значимая зависимость существует между количеством осадков и долей мелиорированных земель для квантилей 0,1 и 0,9 за период 1988–2021 гг. Существование последней зависимости можно объяснить изменениями эвапотранспирации вследствие трансформации мелиорированных земель.

При сопоставлении значений квантилей за периоды 1955–1987 и 1988–2021 гг. оказывается, что в эпоху современного потепления климата значения квантилей 0,05 и 0,1 выросли на 5–10 мм. Это можно объяснить двумя особенностями: во-первых, в период современного потепления климата общее количество осадков возросло на 5–10 %, и, во-вторых, в период современного потепления климата сократилась разница между количеством осадков в самые сухие и самые влажные месяцы года, т. е. зимой и весной количество осадков возросло, а летом практически не изменилось [11, 13, 14]. Изменения значений квантиля 0,9 соответствуют общим особенностям изменения количества осадков по территории Беларуси в период современного потепления климата: в западной и южной части страны отмечается их снижение, а в восточной – прирост; величины этих изменений сопоставимы и доходят до 25–30 мм.

Таблица 2. Табличные и наблюдаемые значения *t*-критерия Стьюдента для связи характеристик подстилающей поверхности со значениями квантилей месячной суммы осадков

Table 2. Tabular and observed t-values for relation between underlying surface characteristics and average monthly precipitation sum

Квантиль	Т _{табл.}	Т _{набл.(ВНУМ)}	Т _{набл.(лес.)}	Т _{набл.(забол.)}	Т _{набл.(мелиор.)}
Период 1955–2021 гг.					
$q = 0,05$	2,0167	1,8980	1,6670	0,0508	1,0565
$q = 0,1$	2,0167	2,6370	1,5728	0,2706	1,1690
$q = 0,9$	2,0167	3,5697	0,1312	0,7196	0,7010
Период 1955–1987 гг.					
$q = 0,05$	2,0796	1,2132	0,1025	1,4208	1,8910
$q = 0,1$	2,0739	0,3520	1,6941	0,1484	0,9784
$q = 0,9$	2,0739	2,5649	0,5081	0,1049	0,9711
Период 1988–2021 гг					
$q = 0,05$	2,0195	3,0102	0,5491	0,1569	1,3932
$q = 0,1$	2,0167	2,4853	1,4708	0,1312	2,1332
$q = 0,9$	2,0167	2,8020	1,0479	1,7740	2,5761

П р и м е ч а н и е. Обозначения те же, что и в табл. 1.

N o t e. Symbols are the same as in table 1.

Заключение. Использованные значения квантилей среднемесячных температур, рассмотренные в работе, представляют собой описательные характеристики зимнего и летнего сезонов. Влияние особенностей подстилающей поверхности на температурный режим проявляется преимущественно в летний период. Главными природными факторами, влияющими на температуру воздуха, являются высота над уровнем моря, заболоченность территории вокруг станции и, в меньшей степени, лесистость. Кроме того, было обнаружено, что значения квантиля 0,9 среднемесячной температуры воздуха в период современного потепления климата (1988–2021 гг.) заметно снизились, что трудно объяснить влиянием естественных факторов.

Квантильный анализ месячных сумм осадков более информативен. Пространственное распределение значений квантилей 0,05 и 0,1 по территории Беларуси относительно однородно. Это является прямым следствием того, что формирование дефицита осадков в Беларуси связано преимущественно с крупномасштабными атмосферными образованиями. В годы с достаточным и (или) избыточным увлажнением главным фактором, определяющим пространственное распределение осадков, является рельеф рассматриваемой территории. Изменения значений квантилей 0,05 и 0,1 месячной суммы осадков в период 1988–2021 гг. подтверждают, что современное потепление климата способствовало некоторому росту количества осадков, особенно в зимне-весенний период (главным образом в северо-восточной части Беларуси), а изменения значений квантиля 0,9 согласуются с общими тенденциями изменениях количества осадков в Беларуси в эпоху современного потепления.

Полученные результаты подтверждают, что квантильная регрессия является хорошим методом для углубления наших представлений о текущем состоянии метеорологических характеристик и их изменения в период современного потепления климата.

Список использованных источников

1. Koenker, R. Regression quantiles / R. Koenker, G. Bassett // *Econometrica*. – 1978. – Vol. 40, iss. 1. – P. 33–50.
2. Future climate emulations using quantile regression on large ensembles / M. A. Haugen [et al.] // *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanology*. – 2019. – Iss. 5. – P. 37–55.
3. Abbas, S. A. Quantile regression based on methods for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions / S. A. Abbas, Y. Xuan, X. Song // *Water Resources Management*. – 2019. – Vol. 33. – P. 4249–4264.
4. Haupt, H. Quantile trend regression and its application to central England temperature [Electronic resource] / H. Haupt, M. Fritsch // *Mathematics*. – Vol. 10, iss. 3. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/math10030413>. – Date of access: 18.01.2022.
5. Spatio-temporal quantile regression analysis revealing more nuanced patterns of climate change: a study of long-term daily temperature in Australia [Electronic resource] / Q. Duan [et al.] // *PLoS ONE*. – 2022. – Vol. 17, iss. 8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271457>. – Date of access: 18.01.2022.
6. Marasinghe, D. Quantile regression for climate data : master's thesis / D. Marasinghe ; Clemson University. – Clemson, 2014. – 63 p.
7. Стерин, А. М. Тренды температуры в свободной атмосфере: расчеты с использованием метода квантильной регрессии / А. М. Стерин, А. С. Лавров // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 99–114.
8. Koenker, R. Quantile Regression / R. Koenker. – Urbana-Campaign : University of Illinois, 2005. – 350 p.
9. Python.org [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.python.org>. – Дата доступа: 10.01.2023.
10. Statsmodels 0.13.5: statistical models, hypothesis tests and data exploration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.statsmodels.org/stable/index.html>. – Дата доступа: 10.01.2023.
11. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск : ТетраСистемс, 2008. – 496 с.
12. Логинов, В. Ф. Сезонные особенности изменения климата Беларуси / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка // Природопользование. – Минск, 2014. – Вып. 25. – С. 16–22.
13. Логинов, В. Ф. Современные изменения регионального и глобального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 314 с.
14. Логинов, В. Ф. Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
15. Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belgidromet.by/>. – Дата доступа: 10.01.2023.
16. QGIS Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qgis.org/ru/site/>. – Дата доступа: 20.01.2023.
17. Хитриков, М. А. Оценка изменений и прогноз биоклиматического потенциала территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.03.08 / М. А. Хитриков ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2021. – 24 с.
18. Нацыянальны атлас Беларусі / Кам. па зям. ресурсах, геадэзіі і картаграфії пры Савецце Міністраў Рэсп. Беларусь ; [рэдкал.: М. У. Мясніковіч і інш.]. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.

References

1. Koenker R., Bassett G. Regression quantiles. *Econometrica*, 1978, vol. 40, iss. 1. pp. 33–50.
2. M. A. Haugen [et al.]. Future climate emulations using quantile regression on large ensembles. Advances in Statistical Climatology. *Meteorology and Oceanology*, 2019, iss. 5. pp. 37–55.
3. Abbas S. A., Xuan Y., Song X. Quantile regression based on methods for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions. *Water Resources Management*, 2019, vol. 33. pp. 4249–4264.
4. Haupt H., Fritsch M. Quantile trend regression and its application to central England temperature [Electronic resource]. *Mathematics*, vol. 10, iss. 3. Available at: <https://doi.org/10.3390/math10030413> (accessed 18 January 2022).
5. Duan Q. Spatio-temporal quantile regression analysis revealing more nuanced patterns of climate change: a study of long-term daily temperature in Australia [Electronic resource]. PLoS ONE, 2022, vol. 17, iss. 8. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271457> (accessed 10 January 2022).
6. Marasinghe D. Quantile regression for climate data: master's thesis. Clemson University, Clemson, 2014, 63 p.
7. Sterin A. M., Lavrov A. S. *Trendy temperatury v svobodnoy atmosfere: raschoty s ispol'zovaniem metoda kvantil'noy regressii* [Temperature trends in upper atmosphere: calculations with quantile regression method]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2021, vol. 2, no. 2. pp. 99–114. (in Russian)
8. Koenker R. Quantile Regression. Urbana-Campaign, 2005, University of Illinois, 350 p.
9. Python.org [Electronic resource]. Available at: <https://www.python.org/> (accessed 10 January 2022).
10. Stasmodels 0.13.5: statistical models, hypothesis tests and data exploration [Electronic resource]. Available at: <https://www.statsmodels.org/stable/index.html/> (accessed 18 January 2022).
11. Loginov V. F. *Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata: prichiny i sledstviya* [Global and regional changes of climate: reasons and consequences]. Minsk, TetraSystems Publ., 2008, 496 p. (in Russian)
12. Loginov V. F., Brovka Y. A. *Sezonnye osobennosti izmeneniya klimata Belarusi* [Seasonal features of climate changes in Belarus]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2014, no. 25, pp. 16–22. (in Russian)
13. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya regional'nogo i global'nogo klimata* [Modern changes in regional and global climate]. Minsk, 2019, 314 p. (in Russian)
14. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and regulatory opportunities]. Minsk, 218 p. (in Russian)
15. Gosudarstvennoye uchrezhdenie "Respublikanskiy centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okrzhayushchey sredy" (Belgidromet) [State institution "Republican center for hydrometeorology, control of radioactive contamination and environmental monitoring"]. Available at: <https://www.belgidromet.by/> (accessed 18 January 2022)
16. QGIS Project. Available at: <https://www.qgis.org/ru/site/> (accessed 20 January 2022)
17. Khitrykau M.A. *Ocenka izmeneniy i prognoz bioklimaticeskogo potenciala Belarusi. Avtoref. dis. kand. geogr. nauk* [Estimation of changes and forecast of bioclimatic potential of Belarus. Cand. of geogr. sci. abstract]. Minsk, 2021. 24 p. (in Russian)
18. *Nacyjanal'ny atlas Belarusi* [National atlas of Belarus]. Minsk, Belkartahrafija Publ., 2002, 292 p. (in Belarusian)

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

Maksim A. Khitrykau – Ph. D. (Geography), Researcher, Institute of Nature Management of the National academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: m.a.hitrykau@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-17-26>

УДК 551.588(476)

Поступила в редакцию 14.03.2023

Received 14.03.2023

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ДИНАМИКУ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РЕГИОНАХ БЕЛАРУСИ

В. В. Коляда

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе регрессионного анализа получены количественные оценки влияния климатических факторов (средняя температура воздуха и количество атмосферных осадков) на динамику урожайности озимых (пшеница, рожь) и ранних яровых (ячмень, овес) зерновых культур для административных областей Беларуси за период 1960–2021 гг. Показано, что в период потепления (1989–2021 гг.) во всех регионах, за исключением Витебской и, отчасти, Могилёвской области, фактические приrostы урожайности существенно снизились. Причем максимально это коснулось озимой ржи, а минимально – озимой пшеницы. В ходе потепления на смену относительно стабильным термическим условиям во всех регионах пришел статистически значимый рост температур в ключевые этапы вегетативного развития, созревания и уборки зерновых культур. В результате, если до активной фазы потепления изменения климата во всех регионах Беларуси в основном способствовали несущественному росту урожайности зерновых культур, то в условиях потепления они повсеместно и статистически значимо снижали их уровни. Исключением здесь являются озимые зерновые культуры в Брестской области. Особенно значительное климатообусловленное снижение урожайности имело место у ранних яровых зерновых культур и, прежде всего, в южных регионах страны.

Ключевые слова: урожайность зерновых культур; средняя температура воздуха; количество атмосферных осадков; множественная регрессия; временной тренд.

Для цитирования. Коляда В. В. Влияние изменения климата на динамику урожайности зерновых культур в регионах Беларуси // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 17–26.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON DYNAMICS YIELD OF GRAIN CROPS IN REGIONS OF BELARUS

V. V. Kalyada

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

Abstract. Based on the regression analysis, quantitative estimates of the influence of climatic factors (average air temperature and precipitation) on the dynamics of the yield of winter (wheat, rye) and early spring (barley, oats) grain crops for the administrative regions of Belarus for the period 1960–2021 were obtained. It is shown that during the period of warming (1989–2021) in all regions, with the exception of Vitebsk and, in part, Mogilev regions, the actual increment in yields decreased significantly. Moreover, this affected winter rye to the maximum, and winter wheat to the minimum. In the course of warming, relatively stable thermal conditions in all regions were replaced by a statistically significant increase in temperatures at key stages of vegetative development, ripening and harvesting of grain crops. As a result, if before the active phase of warming, climate change in all regions of Belarus mainly contributed to an insignificant increase in the yield of grain crops, then under conditions of warming, they everywhere and statistically significantly reduced their levels. The exception here is winter crops in the Brest region. A particularly significant climate-induced decrease in productivity took place in early spring crops and, above all, in the southern regions of the country.

Keywords: grain crop yield; mean air temperature; precipitation; multiple regression; temporal trend.

For citation. Kalyada V. V. The impact of climate change on dynamics yield of grain crops in regions of Belarus. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 17–26.

Введение. Оценка влияния климатических факторов на продуктивность сельскохозяйственных культур в условиях наблюдаемых изменений климата сохраняет свою актуальность. При ее проведении широко используются регрессионные модели погода – урожай, в основе которых находится объединенная выборка данных об урожайности сельскохозяйственных культур и погодных условиях их

формирования на исследуемой территории [1, 2]. Первые обычно представлены статистическими данными по урожайности зерновых культур, которые ввиду особой экономической значимости характеризуются высокой кондиционностью; вторые – наблюдениями за основными климатическими показателями – температурой воздуха и количеством атмосферных осадков на местной сети метеостанций. При этом объединение в единую выборку точечных метеорологических наблюдений за период вегетации культур с материалами площадного учета величин урожайности, датируемыми годом уборки, порождает весьма неоднозначно решаемую проблему их пространственно-временной координации. Простейшим способом пространственной координации является осреднение климатических показателей по территориальным единицам, обеспеченных статистическими урожайными данными. Для территории Беларуси с учетом наличия около 50 действующих метеостанций подобная оценка наиболее удобна на уровне ее шести административных областей – регионов страны. Временной аспект данной проблемы связан с глубиной и детальностью ретроспективного охвата показателей погодных условий. Как известно, урожай формируется в течение продолжительного периода роста и развития сельскохозяйственных культур и метеорологические показатели могут характеризовать его в целом, охватывать сезоны года, отдельные календарные месяцы, критические стадии развития растений и др.

Необходимым условием получения корректных оценок влияния климатических факторов на урожайность сельскохозяйственных культур также является обеспечение достаточного объема выборки и соблюдение классических требований регрессионного анализа [3].

Оценки влияния климатических факторов на урожайность обычно сводятся к расчетам коэффициентов парной либо множественной регрессии [4–6]. При этом в стороне остается вопрос о вкладе современного изменения климата, обычно выражаемого линейными трендами его показателей от времени, в динамику урожайности. Вместе с тем актуальность подобных количественных оценок представляется несомненной как для диагностики факторов, определяющих современные уровни урожайности, так и для прогноза их динамики в будущем.

Методология данной оценки была продемонстрирована на примере динамики урожайности пшеницы в Австралии [7]. Более широкую известность она получила в рамках глобальной оценки влияния климатических трендов на динамику урожайности шести важнейших продовольственных культур: пшеницы, кукурузы, риса, сои, ячменя и сорго [8]. В дальнейшем по данной методике были получены многочисленные оценки климатообусловленной урожайности зерновых культур за период активной фазы современного изменения климата по административным областям Российской Федерации [9, 10]. Данная методология также использовалась автором статьи при оценке роли климатических трендов в динамике урожайности зерновых и зернобобовых культур и озимого рапса на территории Беларуси за период 1990–2012 гг., а также при аналогичной оценке для озимых и ранних яровых зерновых культур в Минской и Могилёвской областях за 1990–2020 гг. [11, 12].

Цель работы – оценить влияние современного изменения климата на динамику урожайности зерновых культур для всех административных областей Беларуси за период современного потепления в сравнении с предшествующим ему периодом, обеспеченный статистическими и климатическими данными.

Материалы и методы исследования. При оценке использованы данные Национального статистического комитета Республики Беларусь для административных областей за 1960–2021 гг., по посевным площадям и валовым сборам озимых (ржь, пшеница) и ранних яровых зерновых (ячмень, овес) культур в сельскохозяйственных организациях страны, традиционно выращиваемых и имеющих сплошное распространение на ее территории, на основании которых рассчитана их урожайность с 1 га посевной площади. Посевные площади и валовые сборы этих культур суммарно в течение рассматриваемого периода превышали 90 %, а в настоящее время охватывают около 60 % этих показателей для зерновых и зернобобовых культур в целом.

Для характеристики погодных условий их вегетации использованы ежемесячные данные Белгидромета по средней температуре воздуха и количеству атмосферных осадков для действующих метеостанций, осредненные нами в границах административных областей. Для озимых зерновых культур использованы данные за следующие периоды: август предыдущего года – август текущего года ($T_{8-1}-T_8$ и $P_{8-1}-P_8$); для ранних яровых зерновых культур – за март – август (T_3-T_8 и P_3-P_8). На основе этой информации сформированы выборки эмпирических данных в виде временных рядов для каждого из регионов страны.

Оценка включала ряд этапов.

- Проведение пошаговой множественной линейной регрессии урожайности зерновой культуры от температуры и осадков, выраженных в первых разностях, с оценкой коэффициентов статистически значимых климатических факторов урожайности по методу наименьших квадратов (МНК) на уровне ошибки не более 10 %.

Полученные регрессионные зависимости протестированы на правильность спецификации модели (тест Рамселя), нормальность распределения (по χ^2), гетероскедастичность (тесты Вайта и Броша – Пагана), автокорреляцию (тесты Броша – Годфри) регрессионных остатков и мультиколлинеарность факторов (метод инфляционных факторов). Результаты оценки помимо значимых коэффициентов регрессии включали оценку качества подгонки модели к эмпирическим данным в виде скорректированного на число регрессоров коэффициента детерминации (R^2_{adj}) [3].

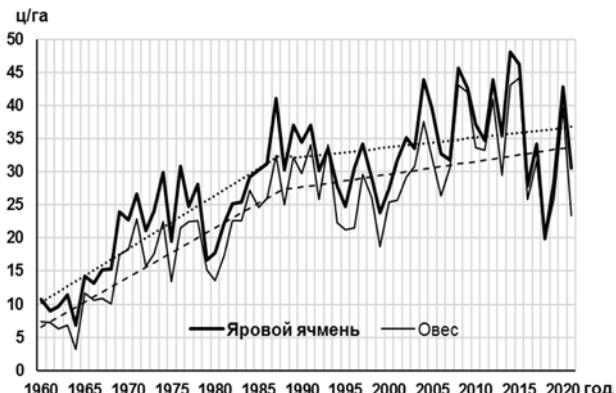
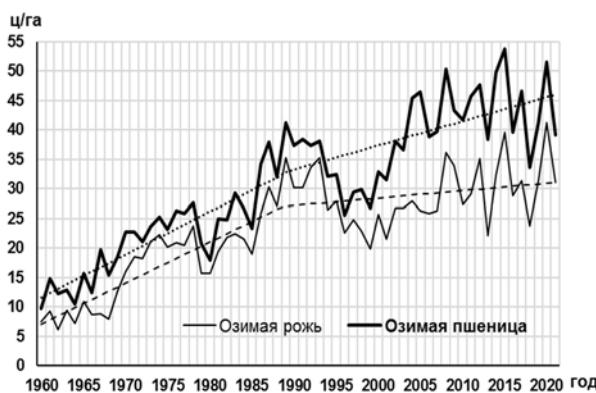
2. Анализ линейных трендов для временных рядов урожайности сельскохозяйственных культур, средних температур воздуха и сумм атмосферных осадков в их исходных значениях по МНК и расчет абсолютных приростов всех показателей как разность конечных и начальных трендовых значений за рассматриваемые периоды.

3. Вычисление климатообусловленного прироста/снижения урожайности как алгебраической суммы произведений коэффициентов климатических факторов урожайности на линейные приrostы соответствующих климатических показателей за рассматриваемый период.

Для оценки параметров регрессионных моделей и верификации полученных зависимостей использован эконометрический пакет GRETl [13]. При интерпретации полученных результатов привлечены данные научно-прикладных справочников по агроклиматическим ресурсам и характеристикам условий произрастания сельскохозяйственных культур Беларуси разных лет издания [14, 15].

Результаты и их обсуждение. Временные ряды анализируемых показателей охватывают значительную часть послевоенного периода и целиком постсоветский период. На него приходятся важнейшие этапы в развитии сельского хозяйства Беларуси, что отразилось на динамике урожайности ее зерновых культур, которая на фоне общего роста имела свои подъемы и падения. Первый такой подъем связан с переводом сельского хозяйства на интенсивный путь развития за счет его комплексной механизации и химизации, а также широкомасштабной мелиорации земель со второй половины 1960-х гг., который продолжался до середины 1970-х гг. Он был прерван неблагоприятными погодными условиями на фоне нараставших застойных явлений в сельском хозяйстве, в том числе в зернопроизводстве. Новый подъем урожайности был связан с принятием комплексным мер в рамках Продовольственной программы (май 1982 г.) и продолжался до конца 1980-х – начала 1990-х гг. Этот период отмечен эпохальными событиями, которые во многом определили современный характер сельского хозяйства Беларуси. К ним относится авария на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г., следствием которой стали отчуждение обширных территорий, вывод из оборота и существенные ограничения при использовании загрязненных земель. Распад СССР в 1991 г. и разрыв экономических связей привели к существенной коррекции структуры сельского хозяйства для обеспечения продовольственной безопасности страны. Свой отпечаток на структуру и особенности ведения сельского хозяйства Беларуси наложило потепление климата, активная фаза которого на территории Беларуси проявилась в самом конце 1980-х гг. [16]. Пик падения валовых сборов и урожайности зерновых культур пришелся на конец 1990-х гг. Очередной подъем урожайности стал следствием реализации серии государственных программ, направленных на возрождение и развитие сельскохозяйственного производства и сельской местности страны. Он продолжался примерно до 2015 г., когда наметилось снижение урожайности зерновых культур.

Данный характер динамики урожайности зерновых культур на примере Гродненской области отражен на рисунке.



Динамика урожайности зерновых культур в Гродненской области на фоне их линейных трендов за периоды до и после активной фазы потепления

Dynamics of grain crop yields in the Grodno region against the background of their linear trends for periods before and after the active phase of warming

Как видно из рисунка, выделенные периоды характеризовались существенными различиями в линейных трендах урожайности зерновых культур за рассматриваемые периоды. Особенно это заметно для озимой ржи, тренды урожайности которой в период до потепления располагаются примерно параллельно трендам урожайности озимой пшеницы, после потепления они практически отсутствуют. Следует заметить, что в Минской, Могилёвской и Гомельской областях тренды урожайности озимой ржи в период активной фазы потепления становятся отрицательными. У озимой пшеницы после потепления тренды урожайности резко уменьшаются лишь в Гомельской области, заметно – в Гродненской области и в меньшей степени – в Брестской области. У ранних яровых зерновых культур также отмечается уменьшение линейных трендов урожайности в период потепления, особенно заметное в обоих южных и западном регионах страны, однако различие между их величинами для ячменя и овса практически отсутствует. Конкретными причинами различий в динамике урожайности зерновых культур в этот период по регионам являлись конкурентные преимущества пшеницы по сравнению с рожью (все регионы), эффект низкой (высокой) базы (Витебская и Могилёвская области в сравнении с Гродненской и Брестской областями), негативные последствия для сельского хозяйства аварии на Чернобыльской АЭС (Гомельская область), а также проявившееся на всей территории Беларуси глобальное изменение климата [16].

С учетом столь сложного характера динамики урожайности, а также (как будет показано ниже) наличия в рядах средних температур воздуха и количества атмосферных осадков линейных трендов, универсальным подходом для корректной оценки зависимости урожайности от климатических факторов является исключение существующих трендов во всех анализируемых показателях за счет перехода к их первым разностям. Переход к представлению рядов урожайности и климатических показателей в разностной форме позволяет устраниТЬ так называемые ближние тренды, которые не связаны непосредственно с межгодовой изменчивостью погодных условий, что приводит, как правило, к увеличению тесноты оцениваемых статистических связей [5].

Оценки коэффициентов регрессии для климатических факторов озимых зерновых культур для регионов Беларуси, расположенные в географическом порядке (север, центр, запад, восток, юго-запад и юго-восток соответственно), представлены в табл. 1.

Согласно полученным оценкам коэффициентов климатических факторов, если ориентироваться прежде всего на большинство регионов Беларуси, рост температуры в августе, в начале сева озимых зерновых культур, способствовал повышению урожайности, а для озимой пшеницы это относится и к выпадающим в этом месяце осадкам. В период осенней вегетации рост температур и количества осадков отрицательно сказывался на урожайности озимых зерновых культур. В холодный период года, прежде всего в феврале и марте, повышенные температуры оказывали положительное влияние на величину урожайности озимых зерновых культур, способствуя успешной перезимовке растений, а также раннему возобновлению их вегетации. В то же время рост количества осадков в месяцы холодного периода, особенно в декабре, напротив, отрицательно сказывался на величине будущей урожайности озимых культур в большинстве регионов страны.

После возобновления вегетации в весенне-летний период на урожайность озимых зерновых культур всех регионов Беларуси отрицательно сказывался прежде всего повышенный температурный фон в июне, а также в июле, когда растения проходят ключевые стадии вегетативного развития и созревания. Отрицательное влияние на урожайность обеих озимых зерновых культур во всех регионах страны в период созревания оказывают атмосферные осадки июля (см. табл. 1).

Оценки коэффициентов регрессии для климатических факторов ранних яровых зерновых культур для всех регионов Беларуси представлены в табл. 2.

Положительные коэффициенты регрессии для температуры марта в большинстве регионов Беларуси (исключением является северный регион – Витебская область, а для ячменя еще и центральный регион – Минская область) здесь указывают на благоприятные для повышения урожайности ранние сроки сева ранних яровых зерновых культур. Сев этих культур в основном приходится на начало апреля и лишь в отдельные годы, главным образом в южных регионах страны, начинается в конце марта [14]. Впрочем, уже в апреле температурные коэффициенты становятся отрицательными во всех регионах, кроме северного, и то лишь для овса. И в остальные месяцы вегетации температурные коэффициенты у обеих ранних яровых зерновых культур имеют отрицательный знак. Здесь следует подчеркнуть повсеместно наблюдаемые статистически значимые на самом высоком уровне отрицательные температурные коэффициенты июня для урожайности как ячменя, так и овса. В меньшей степени по охвату регионов подобные коэффициенты представлены для июля и августа (табл. 2).

Таблица 1. Коэффициенты климатических факторов урожайности озимых зерновых культур по областям Беларуси, 1961–2021 гг.

Table 1. Coefficients of climatic factors for the productivity of winter grain crops by regions of Belarus, 1961–2021

Фактор	Область					
	Витебская	Минская	Гродненская	Могилёвская	Брестская	Гомельская
Озимая рожь						
T_{8-1} , ц/га/°C	1,05***	0,66***	0,78***	0,91***	1,06***	0,75**
T_{10-1} , – // –	–	–	-1,11***	–	-0,88***	–
T_{11-1} , – // –	–	–	–	–	0,42***	–
T_{12-1} , – // –	-0,20***	–	–	–	–	–
T_2 , – // –	0,25***	0,29***	0,37***	0,24**	0,20**	0,35***
T_3 , – // –	0,46***	0,30***	0,73***	0,36***	0,69***	0,53***
T_4 , – // –	-0,44***	–	–	–	–	–
T_6 , – // –	-0,73***	-0,98***	-1,21***	-1,20***	-1,10***	-1,26***
T_7 , – // –	-0,47***	–	–	-0,51***	–	–
T_8 , – // –	–	–	–	–	–	-0,44*
P_{8-1} , ц/га/10 мм	–	0,17**	0,24**	–	–	0,18*
P_{10-1} , – // –	-0,17***	–	-0,15*	-0,17**	-0,19***	–
P_{11-1} , – // –	-0,45***	–	–	–	-0,29*	-0,27**
P_{12-1} , – // –	–	-0,60***	-0,61***	-0,39**	-0,55***	-0,33**
P_1 , – // –	–	–	–	-0,51***	–	-0,46***
P_2 , – // –	0,55***	–	-0,54**	0,70***	–	–
P_3 , – // –	–	–	–	–	-0,48**	–
P_4 , – // –	–	0,19*	–	-0,25*	–	-0,48***
P_5 , – // –	-0,19**	-0,25**	–	-0,31*	–	–
P_6 , – // –	-0,17***	–	–	–	–	–
P_7 , – // –	-0,27***	-0,20***	-0,31***	-0,29***	-0,38***	-0,30***
R^2_{adj}	0,770	0,564	0,577	0,646	0,544	0,618
Озимая пшеница						
T_{8-1} , ц/га/°C	1,16***	1,29***	1,40***	1,52***	1,95***	–
T_{9-1} , – // –	-0,47***	-0,91***	-0,67***	–	–	–
T_{10-1} , – // –	–	–	-0,91***	0,40**	-0,72*	–
T_{12-1} , – // –	–	0,34*	–	–	–	0,33**
T_1 , – // –	–	–	0,21**	–	-0,24**	-0,19*
T_2 , – // –	0,39***	0,50***	0,41***	0,32***	0,57***	0,61***
T_3 , – // –	0,23**	0,42***	0,67***	0,53***	0,90***	0,40**
T_4 , – // –	–	–	–	-0,49***	–	–
T_5 , – // –	–	–	–	–	-0,49**	-0,40*
T_6 , – // –	-0,35**	-0,92****	-1,40***	-1,18***	-1,55***	-0,91***
T_7 , – // –	-1,20***	-0,68**	-0,73***	-0,53***	–	–
T_8 , – // –	0,48**	–	0,83**	–	–	-0,70**
P_{8-1} , ц/га/10 мм	0,20*	0,14*	0,49***	0,39***	0,29**	0,30**
P_{9-1} , – // –	-0,23**	-0,32***	–	–	-0,17*	–
P_{11-1} , – // –	-0,22**	–	–	–	–	–
P_{12-1} , – // –	-0,56***	-0,80**	-0,87***	–	-0,58**	-0,60***
P_1 , – // –	–	–	–	-0,57**	0,54**	–
P_2 , – // –	–	–	–	-1,04***	–	–
P_3 , – // –	–	–	0,57**	–	–	–
P_4 , – // –	–	–	–	–	–	-0,37**
P_5 , – // –	-0,36***	–	–	–	–	–
P_7 , – // –	-0,37***	-0,47***	-0,44***	-0,42***	-0,39***	-0,32***
P_8 , – // –	–	–	0,53***	0,17**	–	–
R^2_{adj}	0,727	0,669	0,672	0,675	0,596	0,607

* $p = 0,1$.

** $p = 0,05$.

*** $p = 0,001$.

П р и м е ч а н и е: серым фоном выделен холодный период года.

Таблица 2. Коэффициенты климатических факторов урожайности ранних яровых зерновых культур по областям Беларуси, 1961–2021 гг.**Table 2. Coefficients of climatic factors of productivity of early spring grain crops by regions of Belarus, 1961–2021**

Фактор	Область					
	Витебская	Минская	Гродненская	Могилёвская	Брестская	Гомельская
Яровой ячмень						
T_3 , ц/га/°C	—	—	0,45***	0,35***	0,50***	0,28**
T_4 , —//—	-0,42*	-0,61**	-0,78**	-0,55**	-1,23***	-0,68***
T_5 , —//—	—	—	—	—	-0,62**	-0,56***
T_6 , —//—	-0,92***	-1,38***	-2,08***	-1,50***	-1,76***	-1,47***
T_7 , —//—	-0,88***	-0,51*	-0,82***	—	-0,64**	—
T_8 , —//—	-0,64***	-0,53*	—	-0,66**	—	-0,60*
P_4 , ц/га/10 мм	—	—	—	—	-0,40**	—
P_5 , —//—	-0,49***	—	—	—	—	—
P_6 , —//—	—	—	—	—	-0,38**	—
P_7 , —//—	-0,23***	-0,26**	-0,39***	-0,26***	-0,26***	-0,21*
P_8 , —//—	-0,23**	—	—	-0,25**	—	-0,39***
R^2_{adj}	0,609	0,504	0,575	0,545	0,545	0,558
Овес						
T_3 , ц/га/°C	—	0,25**	0,68***	0,39***	0,56***	0,32***
T_4 , —//—	—	-0,66***	-0,67**	-0,56***	-1,21***	-0,60**
T_5 , —//—	—	—	—	—	—	-0,23*
T_6 , —//—	-0,87***	-1,43***	-1,96***	-1,51***	-1,72***	-1,43***
T_7 , —//—	-0,88***	—	-0,72***	—	-1,01***	—
T_8 , —//—	-0,76***	-0,83***	—	-0,97***	-0,67*	-0,75***
P_4 , ц/га/10 мм	—	—	—	—	-0,44**	—
P_5 , —//—	-0,54***	-0,26*	—	—	-0,35***	—
P_6 , —//—	—	—	—	—	-0,25*	—
P_7 , —//—	-0,23***	—	—	-0,17**	-0,33***	—
P_8 , —//—	-0,23***	-0,17*	—	-0,27**	—	-0,22*
R^2_{adj}	0,587	0,475	0,482	0,542	0,559	0,521

* $p = 0,1$.** $p = 0,05$.*** $p = 0,001$.

Что касается коэффициентов регрессии урожайности от сумм атмосферных осадков, то все они имеют отрицательный знак и во всех регионах (причем с разной степенью статистической значимости) представлены лишь для ячменя в июле. Максимальное количество значимых коэффициентов, охватывающих большинство месяцев вегетации (с апреля по июль) имеет место в Брестской области. Обращает на себя внимание наличие лишь в Витебской, Могилёвской и Гомельской областях (северный, восточный и юго-восточный регионы) значимых коэффициентов урожайности от суммы осадков за август, т. е. в период массовой уборки этих культур. Исключительно отрицательные оценки коэффициентов регрессии для суммы осадков стали неожиданностью в условиях декларируемого увеличения аридности климата Беларуси.

Оценки линейных трендов средних температур воздуха и количества атмосферных осадков показывают, что рассматриваемые периоды заметно различались по динамике климатических показателей.

Период, предшествующий активной фазе потепления в регионах Беларуси, характеризовался стабильностью термических условий. Коэффициенты линейных трендов средней температуры воздуха во всех регионах с севера до юга представлены статистически незначимыми, преимущественно отрицательными величинами. Исключением являются майские температуры в Брестской области, а также майские и июньские температуры в Гродненской области, т. е. в юго-западном и западном регионах страны, причем на минимальном уровне значимости. В период потепления большинство температурных трендов за те же месяцы резко увеличили свои значения и превратились в положительные, а многие из них стали статистически значимыми на самом высоком уровне. Последнее коснулось прежде всего августа и сентября, т. е. месяцев сева и начала вегетации озимых зерновых культур, первых месяцев их перезимовки (ноябрь и декабрь), а также весеннне-летнего периода вегетативного развития, созревания и уборки ранних яровых и озимых культур (май–август, но прежде всего июнь–август).

Условия увлажнения, характеризуемые количеством атмосферных осадков, в результате потепления изменились по регионам Беларуси менее согласованно. В начале сельскохозяйственного года

они статистически незначимо возросли во всех областях в августе (исключением была лишь Брестская область) и в октябре, но значимо снизились в сентябре. В холодный период года линейные тренды осадков росли в ноябре (снова за исключением Брестской области) и повсеместно в феврале. Только в Могилёвской и Гомельской областях (западный и юго-западный регионы) линейные тренды осадков росли во все месяцы холодного периода. В весенне-летний период отрицательные линейные тренды имели место в апреле в Минской, Могилёвской и Гомельской областях, в июне – во всех регионах страны, а в июле – в Минской и Гродненской областях. В остальные месяцы в регионах Беларуси наблюдались положительные тренды осадков, причем в августе – в период массовой уборки зерновых культур – во всех регионах они были статистически значимыми.

В табл. 3 представлены приросты урожайности зерновых культур по регионам Беларуси за период до и после начала активной фазы потепления.

Таблица 3. Изменение урожайности зерновых культур по областям Беларуси (ц/га), 1960–1988 гг. (I) и 1989–2021 гг. (II)

Table 3. Change in the yield of grain crops by regions of Belarus (cwt/ha), 1960–1988 (I) and 1989–2021 (II)

Изменение урожайности	Область											
	Витебская		Минская		Гродненская		Могилёвская		Брестская		Гомельская	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Озимая рожь												
Фактическое Климатообусловленное В том числе: статистически значимое %	10,5 1,2	8,6 −2,6	16,5 −0,2	−0,5 −2,4	19,5 0,0	4,0 −3,3	13,8 0,8	−1,4 −4,1	18,7 2,0	0,7 −0,5	15,9 1,1	−0,9 −4,0
12	−30	−1	481	0	−83	6	303	11	−73	7	455	
Озимая пшеница												
Фактическое Климатообусловленное В том числе: статистически значимое %	10,7 0,3	14,9 −1,9	18,6 −0,5	16,3 −2,3	20,3 −1,7	13,1 −4,9	16,1 0,4	17,3 −1,2	19,0 0,8	15,4 0,2	18,7 0,3	2,8 −4,1
3	−13	−3	−14	−8	−37	3	−7	4	1	0,0	2	−3,9 −147
Яровой ячмень												
Фактическое Климатообусловленное В том числе: статистически значимое %	8,1 2,3	7,2 −6,0	20,2 1,3	8,2 −6,6	22,6 3,1	4,7 −7,4	13,0 3,1	10,7 −5,4	22,1 1,8	5,7 −7,8	16,9 1,0	0,4 −7,9
29	−83	6	−80	14	−157	24	−51	8	−137	6	−7,0	−1831
Овес												
Фактическое Климатообусловленное В том числе: статистически значимое %	8,9 2,5	10,1 −6,0	15,8 2,6	8,9 −6,7	20,9 4,2	6,2 −6,2	12,5 3,1	11,0 −6,0	20,6 3,1	2,9 −10,2	14,8 1,4	4,8 −7,1
28	−60	17	−75	20	−99	25	−54	15	−348	9	−6,6	−150

* $p = 0,1$.

** $p = 0,05$.

*** $p = 0,001$.

Установленный по линейному временному тренду фактический прирост у всех зерновых культур во всех регионах в первый период является статистически значимым и, как правило, заметно превышает его величину во второй период. Исключением является северный регион – Витебская область, где у озимой ржи и ярового ячменя эти приросты сопоставимы, а для озимой пшеницы и овса фактические приросты второго периода даже превосходят приросты первого периода. Максимальные различия на уровне видов растений имеют место у озимой ржи, для которой прирост урожайности в первый период сменился ее снижением в центральном, восточном и юго-восточном регионах во второй период. Минимальные различия в фактическом приросте по периодам наблюдаются у озимой пшеницы, где этот прирост в период потепления превысил прирост предыдущего периода не только в северном, но и в восточном регионе – Могилёвской области.

До потепления (1960–1988 гг.) климатообусловленные изменения урожайности характеризовались минимальными, в основном положительными величинами. Незначительные климатообусловленные снижения урожайности имели место лишь в Минской области у озимых зерновых культур, а также

в Гродненской области у озимой пшеницы. В целом климатообусловленные изменения урожайности в период, предшествующий активной фазе потепления, находились в пределах от $-1,7$ ц/га у озимой пшеницы до $4,2$ ц/га у овса в обоих случаях для Гродненской области. Статистически значимые климатообусловленные изменения урожайности находились в более узких пределах: от $-0,6$ ц/га у озимой ржи в Минской области до $2,5$ ц/га у ярового ячменя в Гродненской области. Вклад изменения климата в динамику урожайности в этот период у озимых зерновых культур был ниже, чем у ранних яровых зерновых культур, при этом по регионам более высокими их относительными значениями характеризовался северный регион.

В период потепления (1989–2021 гг.) ситуация резко изменилась: повсеместно наблюдается климатообусловленное снижение урожайности зерновых культур. Лишь у озимых культур в Брестской области отмечаются незначительные приросты урожайности. В целом климатообусловленные изменения урожайности в этот период находились в пределах от $-0,5$ ц/га у озимой ржи до $-10,2$ ц/га у овса в Брестской области. Статистически значимые изменения в период потепления изменились от $-1,0$ ц/га у озимой пшеницы в Витебской области до $-8,2$ ц/га у овса в Брестской области. В этот период абсолютные и относительные величины климатообусловленного снижения урожайности у ранних яровых зерновых культур стали существенно большими, чем у озимых зерновых культур, а среди регионов более выраженным в южных регионах страны. Особенно впечатляюще выглядит ситуация в Гомельской области, где высокие климатообусловленные снижения имеют место на фоне минимальных фактических приростов урожайности и даже отрицательного их значения у озимой ржи (см. табл. 3).

Выходы.

1. В течение исследуемого периода (1960–2021 гг.) урожайность озимых и ранних яровых зерновых культур во всех регионах Беларуси кратно выросла, однако в период потепления (1989–2021 гг.) рост урожайности резко снизился. Минимально это коснулось озимой пшеницы, а максимально – озимой ржи, которая сохранила статистически значимый рост урожайности лишь в северном регионе – Витебской области. В то время как в Минской, Могилёвской и Гомельской областях он был отрицательным. Среди регионов в этом отношении наиболее высокими приростами характеризовался восточный регион – Могилёвская область, а минимальными приростами – юго-восточный регион – Гомельская область.

2. В результате потепления на смену стабильным термическим условиям в регионах нашей страны пришел рост температур, который захватил период сева и начала вегетации озимых зерновых культур (август и сентябрь), первые месяцы перезимовки (ноябрь и декабрь), а также ключевые этапы вегетативного развития, созревания и уборки зерновых культур (июнь–август), причем зачастую на самом высоком уровне статистической значимости.

3. Условия увлажнения, характеризуемые суммами атмосферных осадков под влиянием потепления, изменились по регионам менее согласованно. Они незначимо возросли в августе (кроме юго-запада) и октябре, но значимо снизились в сентябре. В холодный период условия увлажнения росли прежде всего повсеместно в ноябре и феврале, но в целом изменились разнородно. Среди регионов в холодный период их тренды выросли лишь в Могилёвской и Гомельской областях. В весенне-летний период тренды осадков повсеместно росли в мае и августе, но снижались в июне.

4. Множественная линейная регрессия показала, что урожайность озимых ржи и пшеницы в регионах положительно отзывалась, прежде всего на температуру августа, февраля и марта, но отрицательно – на температуру июня и, в меньшей степени, июля. Осадки августа оказывали положительное влияние на урожайность, прежде всего озимой пшеницы. В сентябре и в отдельные месяцы холодного периода осадки в основном негативно влияли на урожайность озимых ржи и пшеницы, а в июле это негативное влияние у обеих культур приобрело повсеместный характер.

5. Урожайность ранних яровых зерновых культур положительно реагировала только на температуру марта, а в остальные месяцы вегетационного периода ее реакция была отрицательной. Она проявлялась уже в апреле, но наиболее отчетливо была выражена в июне и, в меньшей степени, в июле. При этом регрессионные оценки показали, что во все месяцы вегетации и во всех регионах атмосферные осадки оказывали отрицательное влияние на урожайность как ярового ячменя, так и овса, что наиболее согласовано по регионам наблюдалось в июле и августе, т. е. в месяцы созревания и массовой уборки этих культур.

6. Будучи невысокой по абсолютной величине и, как правило, положительной в период до активной фазы потепления (1960–1988 гг.), климатообусловленная урожайность под влиянием потепления заметно увеличилась по абсолютной величине, но приобрела в основном отрицательный характер в регионах Беларуси. Особенно значительное климатообусловленное снижение урожайности имело место у ранних яровых зерновых культур и, прежде всего, в южных регионах страны – Брестской и Гомельской областях.

Список использованных источников

1. Auffhammer, M. Empirical studies on agricultural impacts and adaptation / M. Auffhammer, W. Schlenker // Energy Economics. – 2014. – Vol. 46. – P. 555–561.
2. Blanc, E. Approaches to assessing climate change impacts on agriculture: an overview of the debate / E. Blanc, J. Reilly // Review of Environmental Economics and Policy. – Summer 2017. – Vol. 11, iss. 2. – P. 1–12.
3. Картаев, Ф. С. Введение в эконометрику / Ф. С. Картаев. – М., 2019. – 472 с.
4. Дмитренкова, Ю. А. Климатическая обусловленность урожайности сельскохозяйственных культур Республики Беларусь / Ю. А. Дмитренкова // Природные ресурсы. – 2004. – № 1. – С. 26–35.
5. Логинов, В. Ф. Оценка влияния климатических факторов на динамику урожайности основных сельскохозяйственных культур в Брестской области / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек // Природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 5–22.
6. Камышенко, Г. А. Оценка влияния основных климатических факторов на урожайность озимых зерновых культур на территории Беларусь в прогнозных целях / Г. А. Камышенко // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 41–48.
7. Nicholls, N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends / N. Nicholls // Nature. – 1997. – Vol. 387. – P. 484–485.
8. Lobell, D. B. Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming / D. B. Lobell, C. B. Field // Environ. Res. Lett. – 2007. – Vol. 2. – P. 1–7.
9. Сиротенко, О. Д. Новый подход к идентификации функционалов погода – урожай для оценки последствий изменений климата / О. Д. Сиротенко, В. Н. Павлова // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 2. – С. 92–100.
10. Павлова, В. Н. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России / В. Н. Павлова, О. Д. Сиротенко // Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Войкова. – 2012. – Вып. 565. – С. 132–151.
11. Коляда, В. В. Оценки влияния климатических трендов на динамику урожайности сельскохозяйственных культур / В. В. Коляда // Актуальные науч.-техн. и эколог. проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч. конф. – Брест, 2014. – Ч. III. – С.134–139.
12. Коляда, В. В. Влияние климатических трендов на динамику урожайности зерновых культур в Минской и Могилёвской областях // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 36–44.
13. Малова, А. С. Основы эконометрики в среде GRETl / А. С. Малова. – М. : Проспект, 2016. – 112 с.
14. Научно-прикладной справочник по агроклиматическим ресурсам Республики Беларусь на основе современных изменений климата за 1989–2018 годы / под ред. И. С. Данилович, В. И. Мельника // Оценка влияния изменения климата на агроклиматические ресурсы территории Беларусь, разработка и реализация мероприятий по адаптации к изменению климата: заключительный отчет / договор с Минприроды № 56/3/1.10/2020 / № 115Б–2020 от 23.06.2020. – Минск, 2020. – 331 с.
15. Агроклиматический справочник / под ред. Н. А. Малишевской. – Минск : Урожай, 1969 – 248 с.
16. Коляда, В. В. Структурно-функциональные изменения агроценозов Беларусь в условиях потепления климата / В. В. Коляда, Ю. А. Шубская // Природопользование. – Минск, 2009. – Вып. 16. – С. 122–131.

References

1. Auffhammer M., Schlenker W. Empirical studies on agricultural impacts and adaptation. *Energy Economics*, 2014, vol. 46, pp. 555–561.
2. Blanc E., Reilly J. Approaches to assessing climate change impacts on agriculture: an overview of the debate. *Review of Environmental Economics and Policy*, summer 2017, vol. 11, iss. 2, pp. 1–12.
3. Kartaev F. S. *Vvedenie v ekonometriku* [Introduction to Econometrics]. Moscow, 2019, 472 p. (in Russian)
4. Dmitrenkova Yu. A. *Klimaticheskaya obuslovленность sel'skohozyajstvennyh kul'tur Respubliki Belarus'* [Climatic conditionality of crop yields in the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2004, no. 1, pp. 26–35. (in Russian)
5. Loginov V. F., Volchek A. A., Volchek An. A. *Ocenka vliyanija klimaticheskikh faktorov na dinamiku urozhajnosti osnovnyh sel'skohozyajstvennyh kul'tur v Brestskoj oblasti* [Assessment of the influence of climatic factors on the dynamics of productivity of the main agricultural crops in the Brest region]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2006, no. 3, pp. 5–22. (in Russian)
6. Kamyshenko G. A. *Ocenka vliyanija osnovnyh klimaticheskikh faktorov na urozhajnost' ozimyh zernovyh kul'tur na territorii Belarusi v prognoznyh celyah* [Assessment of the influence of the main climatic factors on the yield of winter grain crops in Belarus for forecasting purposes]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 41–48. (in Russian)
7. Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 484–485.
8. Lobell D. B., Field C. B. Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.*, 2007, vol. 2, pp.1–7.
9. Sirotenko O. D., Pavlova V. N. *Novyj podhod k identifikacii funkcionalov pogoda – urozhaj dlya ocenki posledstvij izmenenij klimata* [A new approach to identification of weather-crop functional for estimation of climate change consequences]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, no. 2, pp. 92–100. (in Russian)

10. Pavlova V. N., Sirotenko O. D. *Nablyudaemye izmeneniya klimata i dinamika produktivnosti sel'skogo hozyajstva Rossii* [Observed climate changes and dynamics of Russian agricultural productivity]. *Trudy Glavnogo geofizicheskogo observatorii imeni A. I. Voeikova* [Proc. of Voeikov Main Geoph. Observatory]. 2012, iss. 565, pp. 132–151. (in Russian)
11. Kalyada V. V. *Ocenki vliyaniya klimaticheskikh trendov na dinamiku urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur* [Evaluations of the impact of climate trends on the dynamics of crop yield]. *Aktual'n. nauch.-tekhn. i ekolog. problemy sohraneniya sredy obitaniya : sb. nauchn. statej Mezhd. nauchn.-praktich. konf.* [Proc. Int. Conf. "Actual scientific and technical and ecologist. habitat conservation issues"]. Brest, 2014, ch. III, pp.134–139. (in Russian)
12. Kalyada V. V. *Vliyanie klimaticheskikh trendov na dinamiku urozhajnosti zernovyh kul'tur v Minskoy i Mogilyovskoy oblastyah* [Influence of climate trends on dynamics yield of grain crops in Minsk and Mogilev regions]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 36–44. (in Russian)
13. Malova A. S. *Osnovy ekonometriki v srede GRETL* [Fundamentals of Econometrics in the GRETL Environment]. Moscow, 2016, 112 p. (in Russian)
14. *Nauchno-prikladnoj spravochnik po agroklimaticheskim resursam Respubliki Belarus'* na osnove sovremennoy izmenenij klimata za 1989–2018 gody [Scientific and applied reference book on agro-climatic resources of the Republic of Belarus based on the assessment of modern climate change for 1989–2018] / I. S. Danilovich, V. I. Melnik (ed.). *Ocenka vliyaniya izmeneniya klimata na agroklimaticheskie resursy territorii Belarusi, razrabotka i realizaciya mero-priyatiy po adaptacii k izmeneniyu klimata: zaklyuchitelnyj otchet. dogovor s Minprirody № 56/3/1.10/2020, № 115B-2020 ot 23.06.2020* [Assessment of the impact of climate change on the agro-climatic resources of the territory of Belarus, development and implementation of measures to adapt to climate change: concluding report. Agreement with the Ministry of Natural Resources no. 56/3/1.10/2020 / no. 115B-2020 dated 06/23/2020]. Minsk, 2020, 331 p. (in Russian)
15. *Agroklimaticheskij spravochnik* [Agro-climatic reference book] / N. A. Malishevskaja (ed.). Minsk, 1969. 248 p. (in Russian)
16. Kalyada V. V., Shubskaya Yu. A. *Strukturno-funktional'nye izmeneniya agrocenozov Belarusi v usloviyakh potepleniya klimata* [Structural and functional changes of agrocenosis of Belarus in the climate warming]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2009, vol. 16, pp. 122–131. (in Russian)

Информация об авторе

Валерий Васильевич Коляда – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: valery_v_kalyada@tut.by

Information about the author

Valery V. Kalyada – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: valery_v_kalyada@tut.by

КОЛЕБАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ ПРИПЬЯТЬ

А. А. Волчек, Д. А. Шпока

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Аннотация. В статье изложены результаты исследования устойчивости выборочных оценок статистических параметров для различных отрезков исходного временного ряда максимальных уровней воды р. Припять – г. Мозырь за период с 1881 по 2020 г. Рассмотрены отрезки ряда, различающиеся степенью антропогенного воздействия на уровень воды и типом атмосферной циркуляции. Сделан вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике максимальных уровней воды Припяти у Мозыря, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. Показано, что при анализе закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек желательно использовать методы теории случайных процессов в сочетании с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических.

Ключевые слова: уровень воды; весеннее половодье; гидрологический створ; тренды.

Для цитирования. Волчек А. А., Шпока Д. А. Колебания максимальных уровней воды реки Припять // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 27–40.

MAXIMUM WATER LEVELS FLUCTUATIONS OF THE PRIPYAT RIVER

А. А. Volchak, D. A. Shpoka

Brest State Technical University, Brest, Belarus

Abstract. The article presents the study results of the stability of sample estimates of statistical parameters for various segments of the initial time series of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station for the period from 1881 to 2020. The sections of the series differing in the degree of anthropogenic impact on the water level and the type of atmospheric circulation are considered. It is concluded that there are statistically significant changes in the dynamics of the maximum water levels of Pripyat River at the Mozyr station due to both natural-climatic and anthropogenic changes in the hydrological cycle. It is shown that when analyzing the patterns of long-term fluctuations of the maximum water levels of rivers, it is desirable to use the methods of the random processes theory in combination with the analysis of the considered process genesis and the natural and economic factors determining it, primarily climatic.

Keywords: water level; spring flood; hydrological section; trend.

For citation. Volchak A. A., Shpoka D. A. Maximum water levels fluctuations of the Pripyat River. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 27–40.

Введение. Уровень воды в реке является важной гидрологической характеристикой и широко используется для решения различных теоретических и практических задач в гидрологии и водном хозяйстве. Особый интерес представляют максимальные уровни воды, которые необходимы для определения площади затопления и подтопления, параметров гидротехнических сооружений и т. д. Так, ежегодное затопление поймы благоприятно влияет на пойменные экосистемы, происходит увлажнение почв, формируются зоны нерестилищ, очищается прибрежная зона и т. п. Половодья довольно постоянны во времени, поэтому население прибрежных зон адаптировалось само и приспособило свою хозяйственную деятельность к этому явлению. Хуже дело обстоит, когда половодье переходит в наводнение, что приводит к экономическому ущербу и даже человеческим жертвам. Что касается естественных речных экосистем, то наводнения скорее надо рассматривать как механизм, способствующий их оздоровлению, так как выживают, как правило, более сильные представители флоры и фауны. При этом большой интерес представляет значение гидрологических характеристик в будущем, т. е. в период эксплуатации создаваемых водохозяйственных объектов. В настоящее время все практические методы гидрологических и водохозяйственных расчетов базируются на принятии гипотезы стационарности естественного процесса многолетних колебаний гидрологической величин, т. е. возможности переноса режимных характеристик, определенных в прошлом, в будущее в их неизменном виде. Хотя опыт проектирования и эксплуатации многочисленных гидротехнических и водохозяй-

ственных объектов показал допустимость данного приема, статистическая концепция описания многолетних колебаний уровней воды в реке в ее традиционной интерпретации не может быть признана перспективной при разработке методов прогнозирования уровненного режима [1, 2]. Во-первых, предел предсказуемости стохастических моделей максимальных уровней воды на основе марковой последовательности первого порядка равен одному-двум годам при обеспеченности прогноза ≤60 % [3]. Во-вторых, в результате возрастающей антропогенной нагрузки, глобальном изменении климата и других факторов могут измениться статистические параметры временных рядов.

Разработка многомерных эмпирико-статистических моделей с использованием уравнений множественной регрессии явилась дальнейшим развитием концепции случайности применительно к анализу и прогнозу значений временных корреляций максимальных уровней воды в многомерном пространстве вектора-предиктора, выявленных в предшествующий период с помощью уравнений множественной линейной регрессии, кусочно-линейных уравнений линейной регрессии, нейронных сетей и др. Определяются прогнозные значения максимальных уровней воды в реке. При этом необходимо доказательство возможности распространения выявленных зависимостей на прогнозируемый период и требуется прогноз самого вектора-предиктора, что является не менее сложной задачей, особенно для значительного периода [1, 2].

Методы и данные исследования. Одной из задач исследования являлась оценка стационарности временных рядов максимальных уровней воды рек с различной степенью антропогенной нагрузки. Для этих целей использован временной ряд максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь с координатами гидропоста 52.0527, 29.2451 и отметкой нуля водомерного поста в Балтийской системе высот 110,93 м. Припять, главная река Полесья, является средней по Европейским масштабам рекой черноморского бассейна, принадлежит к равнинному типу с преобладанием снегового питания. Длина Припяти – 761 км, площадь водосбора – 173,7 тыс. км². Общее направление течения реки широтное – с запада на восток, что не характерно для рек Восточной Европы. Русло в истоке канализированное, на остальном протяжении извилистое, слабо меандрирующее, разветвленное, изобилует заливами и примыкающими староречьями [4, 5]. Припять – типичная трансграничная река Европы, протекающая по территории двух государств – Беларуси и Украины, и могущая служить полигоном для оценки различных изменений. Длина исследуемого временного ряда достигает 140 лет (с 1881 по 2020 г.), основную часть которого составляют результаты инструментальных наблюдений Республиканского гидрометеорологического центра за максимальными уровнями воды Припяти в створе Мозыря. Имеющиеся пропуски в рядах наблюдений за максимальными уровнями воды (1917 и 1942 г.) восстановлены в два этапа. На первом этапе общепринятыми методами гидрологической аналогии с использованием рек-аналогов восстановлены максимальные расходы воды [6–9], а на втором этапе по связи $H_{\max} = f(Q_{\max})$, полученной по наблюденным величинам, рассчитаны собственно максимальные уровни воды по зависимости

$$H_{\max}(t) = 179 \ln(Q_{\max}(t)) - 800. \quad (1)$$

Значение коэффициента корреляции при 136 совместных годах наблюдений составляет $r = 0,97$, что значительно больше критического значения, равного $r_{kp} = 0,17$.

Исходный временной ряд значений максимальных уровней воды разбит на два интервала: с 1881 по 1965 г. – период до начала массовых мелиораций, характеризующийся минимальным антропогенным воздействием и условно естественным водным режимом; с 1966 по 2020 г. – период антропогенных воздействия и потепления климата, который, в свою очередь, разбит на два интервала: 1966–1987 гг. – период массовых мелиораций и 1988–2020 гг. – период современных климатических изменений.

Методологической основой исследования являются научные положения о стохастической природе изменчивости уровненного режима рек, что позволило использовать статистические методы анализа временных рядов. Системный анализ накопленной информации и сравнительно-географический метод позволили синтезировать наиболее важные закономерности временных колебаний максимальных уровней воды Припяти в створе Мозыря [10, 11].

Оценка однородности временного ряда максимальных уровней осуществлялась на основе генетического анализа условий формирования речного стока путем выявления причин, обуславливающих неоднородность исходных данных наблюдений.

Первичный анализ однородности гидрологических рядов рекомендуется проводить графическими методами, которые предусматривают построение суммарных (интегральных) кривых связей от времени [9]:

$$\sum_{t=1}^T H_{\max} = f(t), \quad (2)$$

где $\sum_{t=1}^T H_{\max}$ – нарастающее значение максимальных уровней воды во времени; t – текущий год; T – период наблюдений.

Тенденцию колебаний максимальных уровней воды оценивали с использованием линейных трендов [10, 11]:

$$H_{\max}(t) = H_{\max}(0) \pm \Delta H_{\max} t, \quad (3)$$

где $H_{\max}(t)$ – значение максимального уровня в расчетный год, см; $H_{\max}(0)$ – значение максимального уровня в начальный момент времени, см; t – текущий год.

Статистическую однородность исследуемого временного ряда наблюдений относительно естественного уровенного режима рек оценивали с помощью параметрических тестов, в частности различия в средних – с помощью критерия Стьюдента, а различия в характере колебаний уровенного режима – используя критерий Фишера [10, 11]:

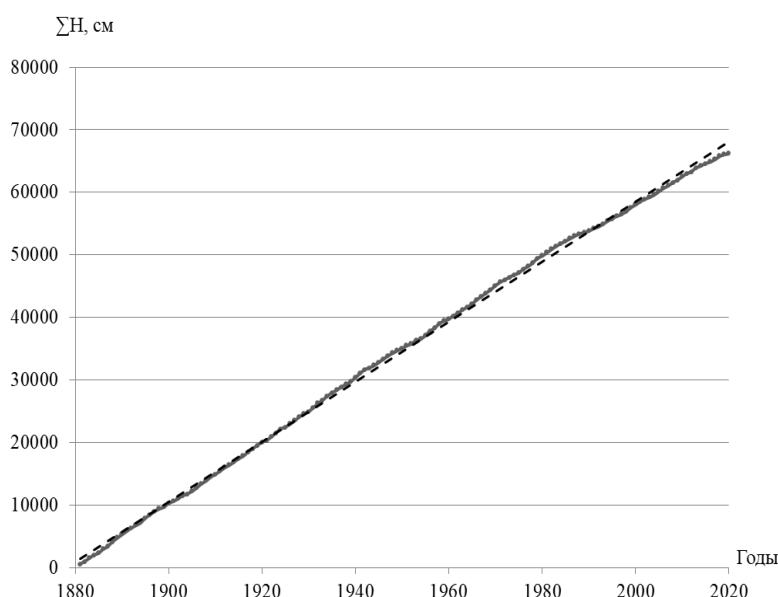
$$t = \frac{\bar{H}_{\max_1} - \bar{H}_{\max_2}}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (4)$$

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (5)$$

где \bar{H}_{\max_1} , \bar{H}_{\max_2} – выборочные средние максимальных уровней воды; σ_1^2 , σ_2^2 – выборочные дисперсии; n_1 и n_2 – объемы выборок.

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

Результаты и их обсуждение. С использованием интегральной кривой (формула (1)) исследуемый ряд проверяли на однородность. Как показал анализ, исследуемый временной ряд наблюдений за максимальными уровнями воды является однородным (рис. 1), что позволяет использовать стандартные статистические методы.



**Рис. 1. Изменение нарастающей суммы максимальных уровней воды во времени
р. Припять в створе г. Мозырь**

**Fig. 1. Change in the increasing sum of the maximum water levels over time
of the Pripyat River at the Mozyr station**

В табл. 1 представлены выборочные оценки основных статистических параметров рассматриваемых временных рядов максимальных уровней воды за выделенные периоды. Эмпирическая кривая обеспеченности для всего рассматриваемого периода, а также для интервалов 1881–1965 гг. и 1966–2020 гг. соответствует нормальному распределению. Поскольку функция распределения вероятностей максимальных уровней воды при таких оценках параметров незначительно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым. Гистограмма, построенная для годовых расходов воды, свидетельствует, что распределение близко к нормальному (рис. 2).

Таблица 1. Основные статистические характеристики максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь

Table 1. Main statistical characteristics of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station

Период наблюдений, гг.	Количество лет наблюдений	Средний максимальный уровень, \bar{H}_{\max} , см	Коэффициент		
			вариации C_v	асимметрии C_s	автокорреляции $r(1)$
1881–2020	140	473	0,26	-0,08	0,11
1881–1965	85	496	0,24	-0,23	-0,08
1966–2020	55	438	0,28	0,14	0,30
1966–1987	22	493	0,23	0,47	0,27
1988–2020	33	401	0,28	0,13	0,13

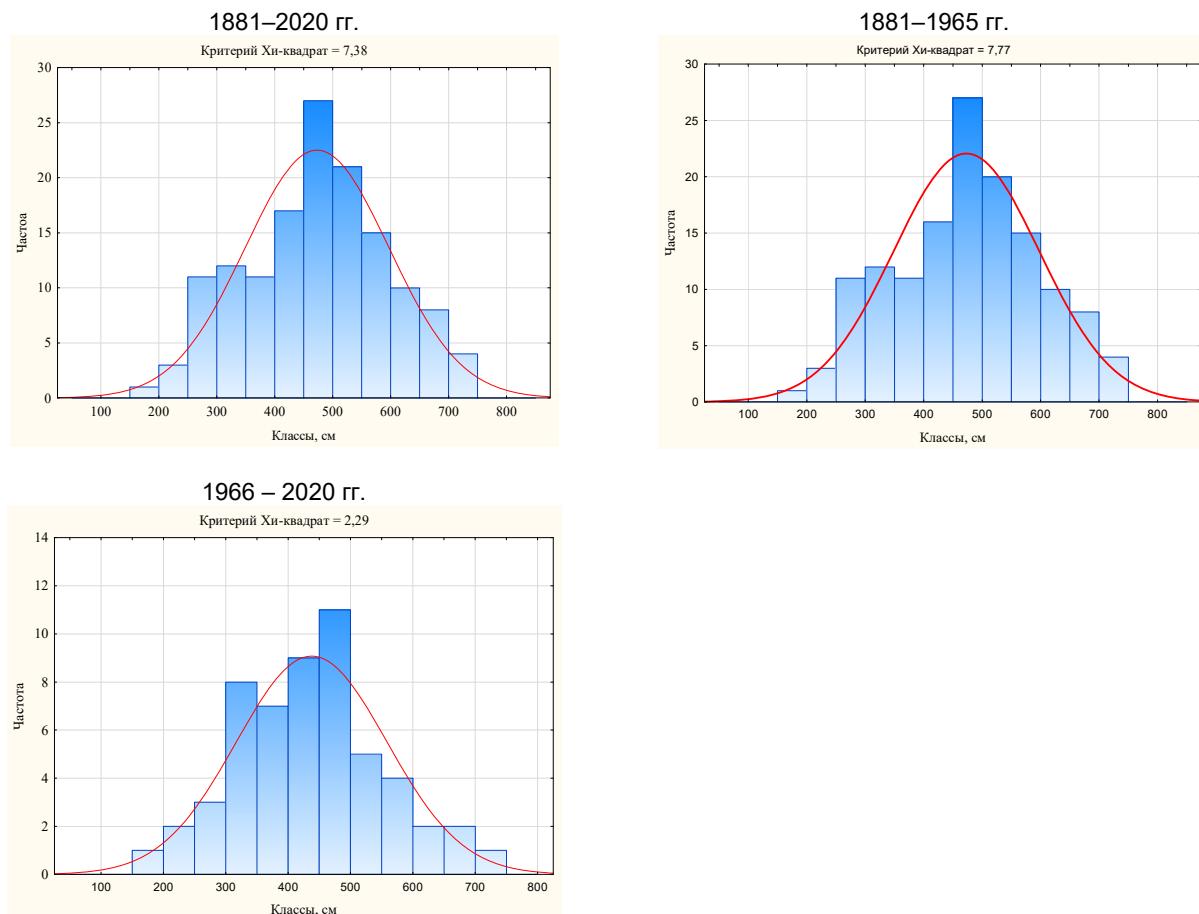


Рис. 2. Гистограмма распределения максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь

Fig. 2. Histogram of the distribution of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station

Следует обратить внимание на повышенные значения максимальных уровней воды в период с 1966 по 1987 г. и пониженные значения коэффициентов вариации, которые вызваны крупномасштабными мелиорациями путем сгущения проводящей сети, что сократило время добегания воды к расчетному створу и росту максимальных уровней, в также сработкой запасов болотных вод. Снижение максимальных уровней в период с 1988 по 2022 г. вызвано зимним повышением температур, частыми оттепелями. Это приводит к инфильтрации воды в почву, что замедляет скорость добегания воды к замыкающему створу, распластанному гидрографу со срезкой пиков и снижению максимальных уровней. Кроме того, в настоящее время ряд мелиоративных систем частично или полностью перестал выполнять свои функции. Все это в совокупности привело к снижению максимальных расходов.

В целом имеет место расходжение значений параметров рассматриваемых интервалов, за исключением последнего (1988–2020 гг.), что позволяет условно считать их выборками из одной генеральной совокупности. Этот же вывод подтверждается результатами сравнения оценок выборочных средних и дисперсий этих интервалов с использованием критериев Стьюдента и Фишера, которые показали, что различия оценок этих параметров статистически значимы для естественного периода и периода антропогенных воздействий и климатических изменений. Таким образом, использование временного ряда максимальных уровней воды Припяти в створе Мозыря за период с 1881 по 1987 г. (до периода современного потепления) вполне корректно.

На рис. 3 представлен многолетний ход максимальных уровней воды рассматриваемой реки. Колебания уровней носят циклический характер с тенденцией уменьшения в последние годы. Для количественной оценки тенденций в колебаниях уровней использовали линейные тренды за рассматриваемые интервалы. В целом за рассматриваемый период наблюдается тенденция уменьшения максимальных уровней воды со скоростью $-8,4$ см/10 лет. За период с 1881 по 1965 г. прослеживается также тенденция снижения со скоростью $-3,6$ см/10 лет. Резкое снижение максимальных уровней происходило в период массовых мелиораций с середины 1960-х до 1990-х годов. В этот период скорость уменьшения максимальных расходов достигла $61,2$ см/10 лет. Теперь, в период современного потепления, наблюдается некоторый рост со скоростью $6,1$ см/10 лет (табл. 2).

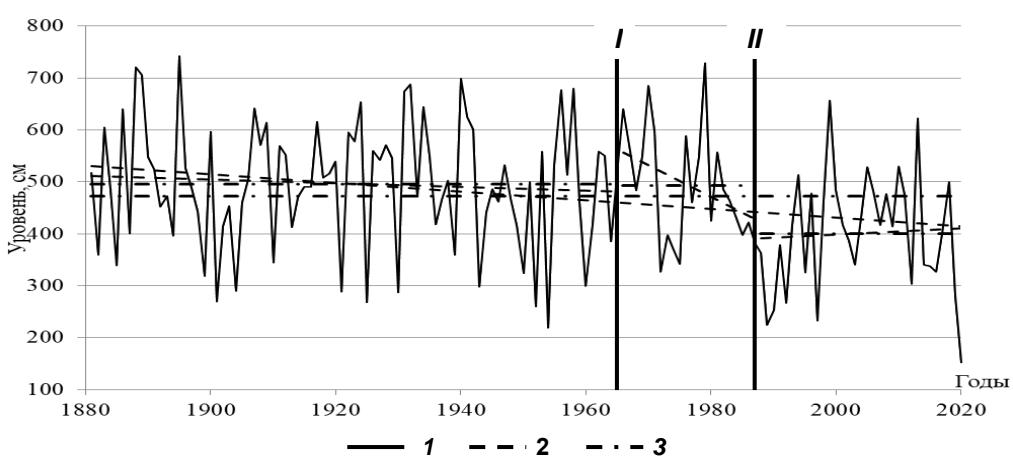


Рис. 3. Многолетний ход максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь: 1 – многолетний максимальный уровень воды; 2 – линия тренда; 3 – средние максимальные уровни; вертикальные линии: I – год начала крупномасштабной мелиорации; II – год начала современного потепления

Fig. 3. The long-term course of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station: 1 – long-term maximum water level; 2 – trend line; 3 – average maximum levels; vertical lines: I – of the beginning of large-scale reclamation; II – year of the beginning of modern warming

Таблица 2. Параметры моделей временного ряда максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь для различных интервалов

Table 2. Parameters of time series models of maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station for various intervals

Параметр	Временной интервал, гг.				
	1881–2020	1881–1965	1966–2020	1966–1987	1988–2020
Линейные тренды – $H_{\max}(t) = H_{\max}(0) \pm \Delta H_{\max} t$					
$\alpha = 10 \cdot \Delta H_{\max}$, см/10 лет	$-8,4$	$-3,6$	$-26,7$	$-61,2$	$6,1$
Коэффициент корреляции	$-0,27$	$-0,23$	$-0,35$	$-0,36$	$0,05$
Зависимости $H_{\max}(t) = A \cdot \ln(Q_{\max}(t)) - B$					
A	179	188	155	165	163
B	-800	-865	-634	-690	-703
Коэффициент корреляции	$0,97$	$0,99$	$0,87$	$0,94$	$0,89$

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые значения выделены полужирным шрифтом.

Анализ однородности рядов стока. Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к максимальным уровням воды Припяти в створе Мозыря за 1881–2020 гг. ($n = 140$ лет). При этом использовали пять версий исследуемого временного ряда: данные за весь период наблюдений, данные за период естественного режима, данные за период крупномасштабных мелиораций, за период современных климатических изменений и за период антропогенных воздействий и климатических изменений. В табл. 1 приведены основные статистические параметры этих интервалов исследуемого временного ряда, а в табл. 3 – матрица статистических критериев Стьюдента и Фишера, а также и их критические значения.

Таблица 3. Статистические критерии (числитель) для различных интервалов временного ряда максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь и их критические значения (знаменатель)

Table 3. Statistical criteria (numerator) for various time series intervals of maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station and their critical values (denominator)

Временной период, гг.	Временной интервал, гг.					
	1966–2020		1966–1987		1988–2020	
	<i>t</i> -критерий для средних	<i>F</i> -критерий для дисперсий	<i>t</i> -критерий для средних	<i>F</i> -критерий для дисперсий	<i>t</i> -критерий для средних	<i>F</i> -критерий для дисперсий
1881–1965	2,79/166	1,02/1,49	0,12/1,69	1,18/1,89	3,85/1,67	1,13/1,68
1966–1987	–	–	–	–	2,96/1,67	1,05/2,02

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые значения выделены полужирным шрифтом.

Анализ средних значений годовых расходов воды для пяти рассматриваемых интервалов, на которые разбит исходный временной ряд, показывает, что при сравнении периода 1881–1965 гг. с периодами 1966–2020 гг., 1966–1987 гг. и 1988–2020 гг. есть основания отвергнуть нулевую гипотезу и различия в средних величинах признать существенными, в то же время для дисперсий для всех рассматриваемых интервалов нет оснований отвергать нулевую гипотезу. Таким образом, размах колебаний максимальных уровней воды Припяти можно считать однородным.

При изучении закономерностей многолетних колебаний уровенного режима рек несомненный интерес представляет совместный анализ динамики максимальных уровней воды и обобщенных характеристик циркуляции атмосферы. В качестве последних обычно используется классификация Вангенгейма – Гирса, основанная на трех формах циркуляции *W* (западной), *E* (восточной) и *C* (меридиональной) [1]. Подробно этот вопрос для метеорологических рядов рассмотрен в монографии В. Ф. Логинова [13], где приведен их полный анализ. Поэтому в настоящей работе остановимся вкратце на связи максимальных уровней воды Припяти с типом атмосферной циркуляции. Как видно из табл. 4, диапазон изменения характеристик максимальных уровней воды весьма значителен и крайние его значения существенно больше (меньше) аналогичных значений для n -летних периодов исходного ряда.

Таблица 4. Основные статистические параметры максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь

Table 4. The main statistical parameters of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station

Временной период, гг.	n , лет	Тип атмосферной циркуляции	Статистический параметр					
			H_{cp} , см	C_v	$r(1)$	линейный тренд α , см/10 лет	r	A
1881–1890	10	<i>C</i>	532	0,26	-0,17	201	0,43	184
1891–1928	38	<i>W</i>	493	0,23	-0,14	15	0,14	192
1929–1939	11	<i>E</i>	510	0,24	-0,13	-105	-0,27	185
1940–1948	9	<i>C</i>	512	0,23	0,33	-216	-0,50	189
1949–1964	16	<i>E + C</i>	460	0,35	-0,09	62	0,21	188
1965–1988	24	<i>E</i>	488	0,34	0,30	-62	-0,40	198
1989–2010	22	<i>W</i>	415	0,26	0,21	84	0,50	150
2011–2020	10	<i>E</i>	374	0,35	-0,14	-211	-0,49	229
								-1153

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые значения выделены полужирным шрифтом.

Анализ линейных трендов для интервалов с различным типом атмосферной циркуляции показал широкий диапазон колебаний градиентов изменений максимальных уровней – от -216 см/10 лет (1940–1948 гг. (*C*)) до 201 см/10 лет (1881–1890 гг. (*C*)), меньшие градиенты имели место для других типов атмосферной циркуляции. Статистически значимые градиенты отмечаются только для двух интервалов: 1965–1988 гг. (*E*) и 1989–2010 гг. (*И*). Надо отметить, что отрицательные градиенты свойственны типу атмосферной циркуляции (*E*). Интервал 2011–2020 гг. отличается большим отрицатель-

ным градиентом, что обусловлено типом атмосферной циркуляции, влияние которой усилено современными климатическими изменениями.

Проверка гипотезы однородности рассматриваемых параметров максимальных уровней воды для периодов с разными типами циркуляции основана на использовании критериев Стьюдента и Фишера. Как показал анализ, для некоторых отрезков времени расхождения в параметрах существенны и могут быть признаны статистически достоверными. Подробная характеристика различий в рассматриваемых периодах приведена в табл. 5. По математическому ожиданию максимальные уровни воды за все рассматриваемые периоды до 1989 г. являются статистически неразличимыми. В то же время средние величины за два последних периода являются статистически различимыми почти со всеми периодами, кроме 1949–1964 (тип атмосферной циркуляции – E + C), а именно: период 1989–2010 гг. (И) с периодами 1881–1890 гг. (C), 1891–1928 гг. (И), 1929–1939 гг. (E), 1940–1948 гг. (C) и 1965–1988 гг. (E); период: 2011–2020 гг. (E) с периодами 1881–1890 гг. (C), 1891–1928 гг. (И), 1929–1939 гг. (E), 1940–1948 гг. (C) и 1965–1988 гг. (E). Период 2011–2020 гг. (E) является периодом с самыми меньшими максимальными уровнями, поэтому он отличается от большинства других периодов, в том числе и периодов с аналогичным типом атмосферной циркуляции – 1929–1939 гг. (E) и 1965–1988 гг. (E). Это вызвано большим влиянием современного климатического потепления, чем типом атмосферной циркуляции. Аналогичная картина наблюдается и для периода 1989–2010 гг. (И). Если расположить периоды типов атмосферной циркуляции по убыванию максимальных уровней воды Припяти, то получается следующая картина: C – C – E – W – E – E + C – W – E. Рассматриваемые участки однородны по дисперсиям. Различий в коэффициентах автокорреляции при использовании критериальных статистик установить не удалось, хотя в некоторых случаях коэффициенты автокорреляции приближаются к критическим, но не превышают их. Это обусловлено недостаточной длиной рассматриваемых периодов.

Таблица 5. Статистические критерии (числитель) для различных интервалов временного ряда максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь и их критические значения (знаменатель)

Table 5. Statistical criteria (numerator) for different time series intervals of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station and their critical values (denominator)

Временной период, гг.	t-критерий для средних	F-критерий для дисперсий	Временной период, гг.	t-критерий для средних	F-критерий для дисперсий
Временной интервал 1891–1928 гг.					Временной интервал 1989–2010 гг.
1881–1890	0,83/1,73	1,49/2,14	1881–1890	2,39/1,76	1,66/2,34
1891–1928	–	–	1891–1928	2,81/1,68	1,07/1,96
Временной интервал 1929–1939 гг.					2,11/2,11
1881–1890	0,39/1,73	1,15/3,02	1940–1948	2,13/1,76	1,19/2,42
1891–1928	0,38/1,75	1,30/2,10	1949–1964	1,08/1,70	1,61/2,18
Временной интервал 1940–1948 гг.					2,28/1,68
1881–1890	0,34/2,11	1,34/3,39	Временной интервал 2011–2020 гг.		
1891–1928	0,44/1,78	1,11/2,20	1881–1890	2,63/1,73	1,09/3,18
1929–1939	0,05/1,73	1,72/3,35	1891–1928	2,62/1,77	1,37/2,14
1940–1948	–	–	1929–1939	2,39/1,73	1,05/3,02
Временной интервал 1949–1964 гг.					1940–1948
1881–1890	1,32/2,09	1,00/3,00	1949–1964	1,58/1,72	1,11/3,01
1891–1928	0,87/1,71	1,50/1,64	1965–1988	2,42/1,75	1,43/2,32
1929–1939	0,97/1,71	1,15/2,85	1989–2010	0,86/1,75	1,46/2,37
1940–1948	1,00/1,73	1,35/3,22			
Временной интервал 1965–1988 гг.					
1881–1890	0,90/1,76	1,56/2,32			
1891–1928	0,17/2,00	1,56/2,32			
1929–1939	0,48/2,12	1,36/2,28			
1940–1948	0,53/1,76	1,16/2,37			
1949–1964	0,70/2,05	1,57/2,13			
1965–1988	–	–			

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые значения выделены полужирным шрифтом.

Таким образом, анализируемый ряд максимальных уровней воды неоднороден по математическому ожиданию, но однороден по дисперсии.

В то же время можно полагать, что для отдельных временных периодов с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции выполняются условия стационарности. Переход же от одного состояния к другому происходит в естественных условиях под воздействием внешних климатических факторов, существенно изменяющих соотношение между осадками и испарением в пределах территории бассейна Припяти. В итоге можно сделать вывод, что многолетние колебания макси-

мальных уровняй воды р. Припять вызваны климатическими факторами, причина которых кроется в процессах крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суши [1].

Важной гидрологической характеристикой является связь уровней воды с их расходами, т. е. зависимость $H = f(Q)$. Для всего исследуемого периода такая связь представлена моделью (1). На рис. 4 представлены данные модели, построенные для различных интервалов, параметры которых указаны в табл. 2 и 4. Все модели имеют высокие, статистически значимые коэффициенты корреляции – от 0,87 до 0,99.

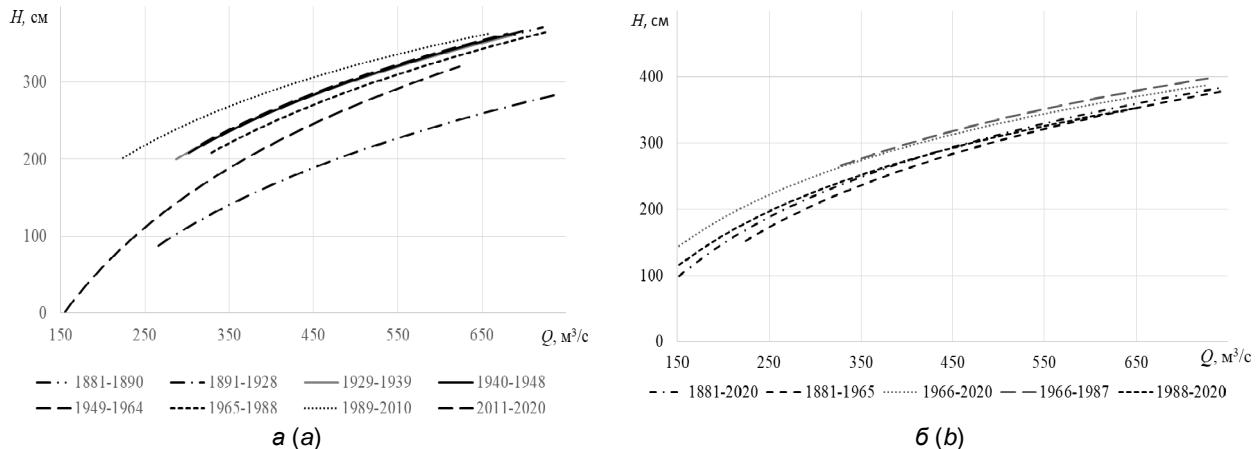


Рис. 4. Графики зависимости $H = f(Q)$ для различных интервалов:
а – по типам атмосферной циркуляции; б – по антропогенным и климатическим влияниям

Fig. 4. Graphs of the dependence $H = f(Q)$ for different intervals:
a – by types of atmospheric circulation; b – by anthropogenic and climatic influences

Как видно из рис. 4, в целом различия в характере зависимостей $H = f(Q)$ сохраняются, хотя за отдельные периоды есть существенные отклонения, например, в 1891–1928 гг. (тип атмосферной циркуляции – И).

Анализ цикличности уровней воды. Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний максимальный уровень воды используется концепция цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза уровней воды заключается в их апериодичности, так как фаза, амплитуда и длительность цикла меняются без видимых закономерностей. Кроме того, пока нет единого мнения о природе этих циклов, так как отсутствует объективная методика выделения и анализа циклов уровней рек. Считается, что циклы обусловлены либо влиянием внешних (космофизических факторов), либо автоколебательными процессами в системе атмосфера – гидросфера Земли, либо естественными свойствами любой случайной последовательности.

По выборкам различной длины максимальных уровней воды оценивали статистические параметры и исследовали степень их изменения от выборки к выборке. Выборки строили как участки исследуемых рядов, различающихся начальной точкой и длиной. В частности, рассматривали отрезки ряда, различающиеся степенью антропогенного воздействия на уровни воды и типом атмосферной циркуляции. Кроме того, были определены статистические параметры для отрезков исходного ряда, полученные в результате процедуры скользящего 20-, 30- и 50-летнего осреднения. Проверку однородности выборочных статистических параметров осуществляли с помощью тестовых критериев Стьюдента и Фишера [12].

Как видно из рис. 5, крайние значения математического ожидания различных периодов осреднения имеют существенный размах. Это обусловлено маловодьем периода современного потепления климата на стыке столетий, что вносит во временной ряд максимальных уровней воды Припяти существенные различия. Такие различия в оценках параметров свидетельствуют о применении гипотезы о нестационарности рассматриваемого временного ряда, что подтверждает проверка гипотезы об однородности рассматриваемых статистических параметров для различных периодов сглаживания, которые при доверительной вероятности 5%-го расхождения в этих параметрах могут быть признаны статистически достоверными в рассматриваемых случаях. Сопоставление многолетних скользящих изменений средних и дисперсий показывает слабую синхронность в их изменениях. Наибольшая дисперсия отмечается в начале и середине XX в., тогда как средние значения максимальных уровней воды имеют устойчивые значения до современного потепления, а затем наблюдается резкое падение. В то же самое время многоводный период второй четверти XX в. совпал с повышенной изменчивостью максимальных уровней воды. Высокая изменчивость стока в 1930–70-е годы приходится на годы как большой, так и малой водности. Интересно отметить, что имеется определенная синхронность изменения скользящих дисперсий и векового хода солнечной активности. Максимумы векового

цикла солнечной активности приходятся соответственно на 30–50-е годы XIX в. и вторую половину XX в., а минимум – на конец XIX в. и начало XX в. Это может свидетельствовать о том, что изменчивость гидрологических характеристик возрастает при высокой солнечной активности.

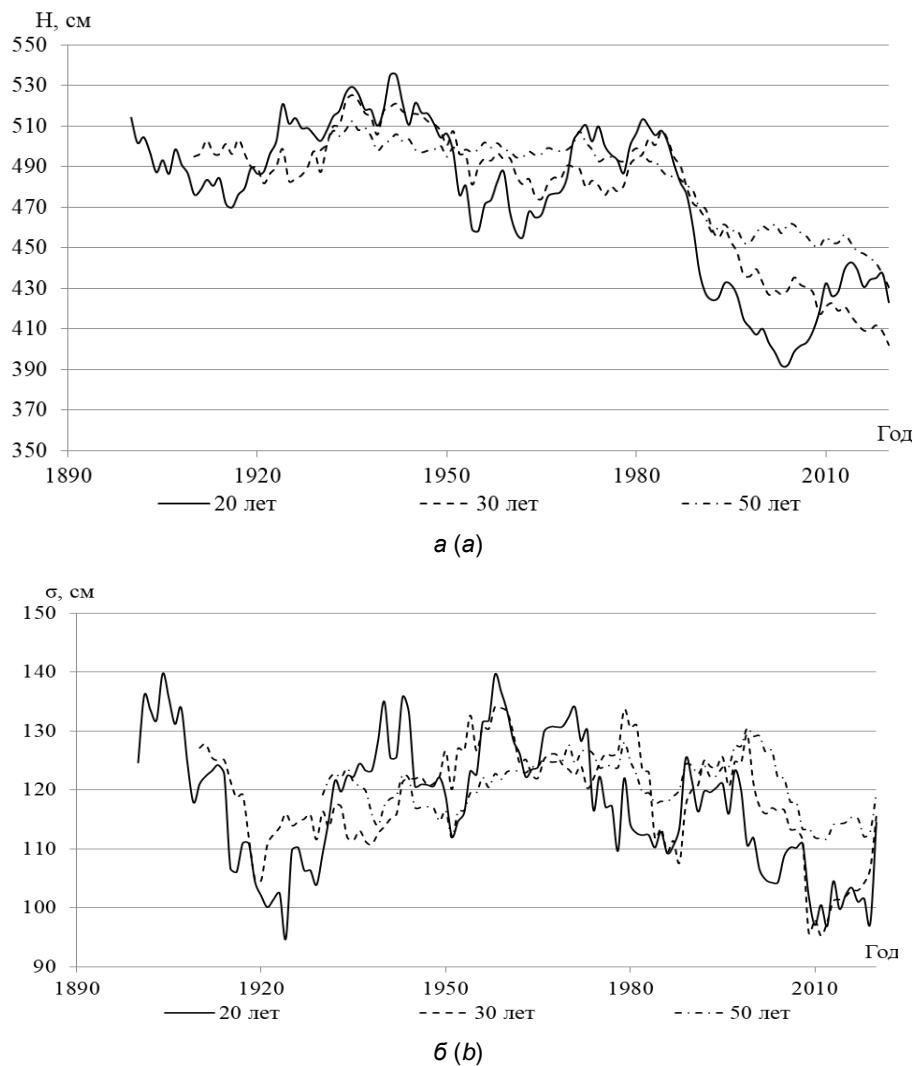


Рис. 5. Динамика скользящих средних (а) и дисперсий (б) за различные периоды осреднения максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь

Fig. 5. Dynamics of moving averages (a) and dispersions (b) for various periods of averaging the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station

Проведение более тонких исследований амплитудно-частотных характеристик процесса требует применения спектрального анализа. Для обнаружения характерных ритмов, анализа их устойчивости или, наоборот, изменчивости во времени, нами использована процедура спектрально-временного анализа (СВАН), который представляет спектральный анализ в скользящем временном окне. Длина окна выбирается исходя из требований получения данных о гармониках в наиболее широком частотном диапазоне, из требуемой детальности фактического частотного состава процесса. При слишком малом окне теряется информация о низких частотах, а при большом окне СВАН-диаграмма становится слишком зарегулированной. В нашем случае величина временного окна принята 50 лет (рис. 6). Выбор такой длины временного окна диктуется методическими соображениями, поскольку она составляет примерно одну треть от длины имеющегося временного ряда, что позволяет проследить изменчивость статистических свойств и, кроме того, достаточно велика, чтобы усреднить влияние известных климатических факторов, например 11-летней периодичности солнечной активности [15].

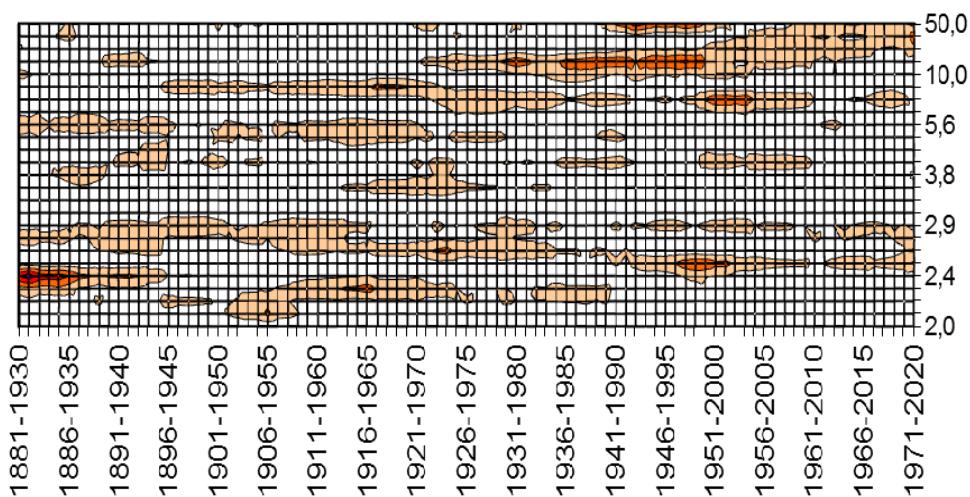


Рис. 6. СВАН-диаграмма максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь (длина скользящего окна – 50 лет)

Fig. 6. STAN diagram of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station (the length of the sliding window is 50 years)

Анализ рис. 6 позволил констатировать факт наличия 2,4-летнего цикла (1881–1935 гг.), мощного 20-летнего цикла (1936–1999 гг.) и 50-летний цикл (1941–1999 гг.).

Как показала практика применения спектральных анализов и методов отыскания скрытых периодичностей, результаты в моделях прогноза не дали положительного результата [3]. К числу слабых сторон такого подхода помимо неустойчивости циклов относится и возможность их физической (генетической) интерпретации. Последнее характерно и для всех методов, разработанных в рамках статистической концепции.

В связи с тем, что оба критерия дают сравнимые результаты, использование принципа цикличности (квазипериодичности) при анализе и прогнозе многолетних колебаний максимальных уровней воды допустимо.

Построение прогнозных моделей. Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать совместно выборочные автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяется характер изменения годового стока рек. При этом используются следующие критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели [1, 14], приведенные в табл. 6.

Таблица 6. Критерии нестационарности процесса и выбора модели

Table 6. Criteria for non-stationarity of the process and model selection

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $t = 1$	AP(1) – авторегрессия первого порядка
Форма затухания в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает	Высокое значение лишь при $t = 1$ и $t = 2$	AP(2) – авторегрессия второго порядка
Высокое значение при $t = 1$, остальные значения нулевые	Экспоненциально затухает или осциллирует с изменением знака	CC(1) – скользящее среднее первого порядка
Высокое значение при $t = 1$ и $t = 2$, остальные значения нулевые	Форма синусоидальной волны или экспоненциально затухает	CC(2) – скользящее среднее второго порядка
Экспоненциально затухает, начиная с $t = 1$ (затухание может быть монотонным или осциллирующим)	Экспоненциально затухающие значения ординат либо монотонно осциллирует	AP CC(1) – авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

Строго говоря, исследуемый временной ряд максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь (рис. 7) не отвечает моделям, описанным в табл. 6 в полной мере. Поэтому представленный временной ряд идентифицирован моделями AP(1) и AP(2).

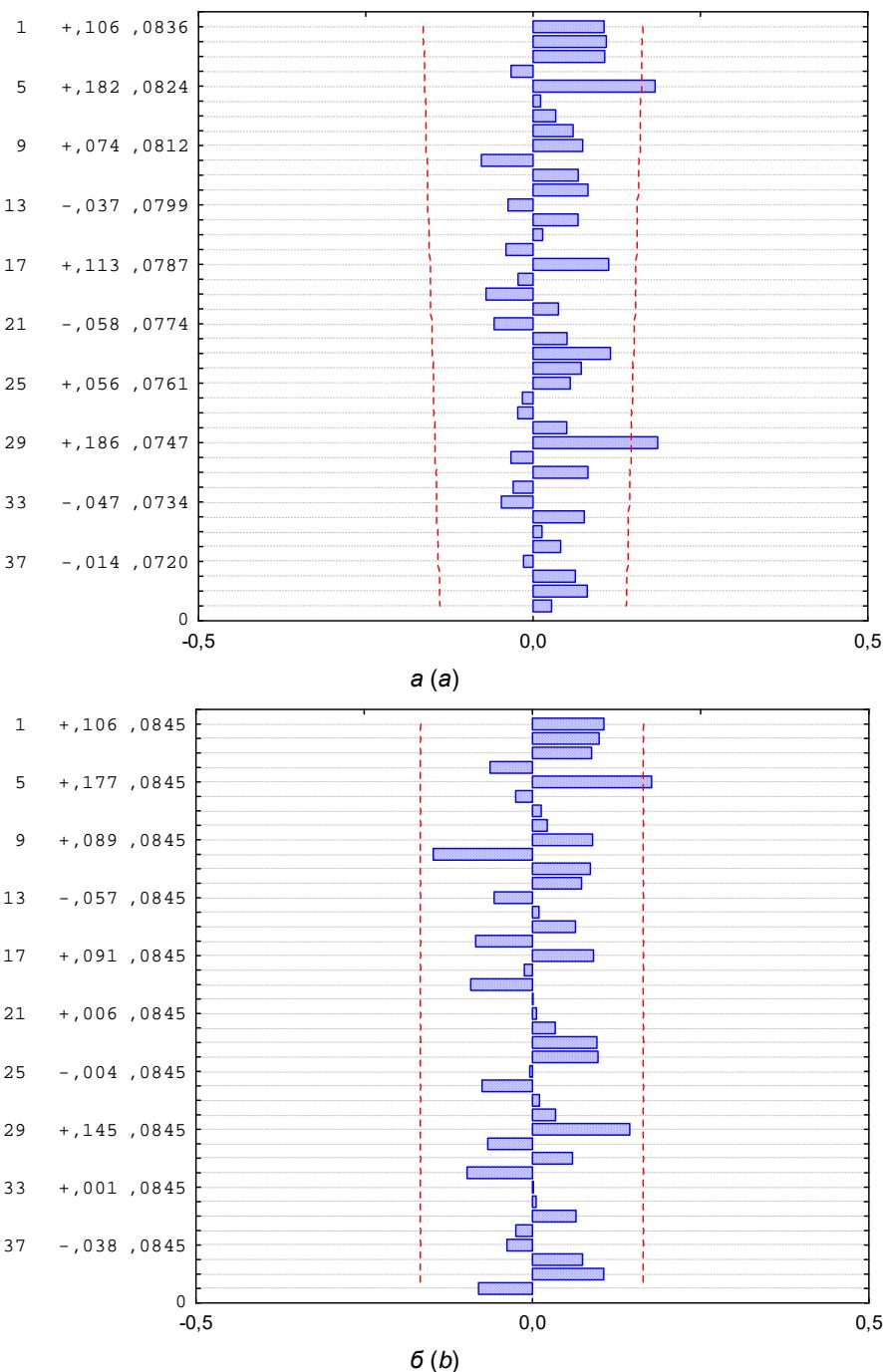


Рис. 7. Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь

Fig. 7. Autocorrelation function (a) and partial autocorrelation function (b) of the maximum water levels of the Pripyat River at the Mozyr station

Модель АР(1) имеет вид

$$H_{\max}(t) = \bar{H}_{\max} + r(1) [H_{\max}(t-1) - \bar{H}_{\max}] + \xi(t), \quad (6)$$

где $H_{\max}(t)$ и $H_{\max}(t-1)$ – максимальные уровни воды в t -й и предшествующий ей $(t-1)$ -й годы соответственно, см; $\xi(t)$ – гауссовский «белый шум» с нулевым средним и $\sigma_{\xi} = \sigma_H \sqrt{1 - r(1)^2}$.

В соответствии с уравнением (3) для временного ряда максимальных уровней воды Припяти при $r(1) = 0,11$ $\bar{H}_{\max} = 473$ см (табл. 1), а также $\sigma_{\xi} = 123,7$ см и $\sigma_H = 124,3$ см.

$$H_{\max}(t) = 0,11H_{\max}(t-1) + 421 + \xi(t).$$

Модель AR(2) имеет вид

$$H_{\max}(t) = \bar{H}_{\max} + r(1)[H_{\max}(t-1) - \bar{H}_{\max}] + r(2)[H_{\max}(t-2) - \bar{H}_{\max}] + \xi(t), \quad (7)$$

где $H_{\max}(t)$, $H_{\max}(t-1)$ и $H_{\max}(t-2)$ – максимальные уровни воды в t -й и предшествующие ему $(t-1)$ -й и $(t-2)$ -й годы соответственно, см; $\xi(t)$ – гауссовский «белый шум» с нулевым средним и $\sigma_\xi = \sigma_H \sqrt{1 - r(1)^2}$.

В соответствии с уравнением (7) для временного ряда максимальных уровней воды Припяти при $r(1) = 0,11$, $r(2) = 0,11$ и $H_{\text{ср}} = 473$ см (см. табл. 1), а также $\sigma_\xi = 123,7$ см и $\sigma_H = 124,3$ см.

$$H_{\max}(t) = 0,11[H_{\max}(t-1) + H_{\max}(t-2)] + 369 + \xi(t).$$

Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик максимальных уровней воды Припяти за почти 140-летний период позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике среднемноголетних максимальных уровней воды, обусловленных естественными климатическими изменениями гидрологического цикла и антропогенными воздействиями. Так как $\bar{H}_{\max} \neq \text{const}$, можно сделать вывод о стационарности режима максимальных уровней воды лишь на отдельных интервалах периода наблюдений. В то же время характер колебаний максимальных уровней воды является однородным и его дисперсия $\sigma_{\bar{H}_{\max}} = \text{const}$. В этом случае практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике основных гидрологических характеристик: плавного возрастания или убывания (монотонный тренд), периодических изменений (циклический тренд), постоянства в течение каких-то периодов времени и резкого изменения при переходе от одного отрезка к другому (ступенчатый тренд). Все эти ситуации могут быть описаны полиномиальной аппроксимацией тренда вида [1]:

$$H_{\max}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \phi_i(t), \quad (8)$$

где $\phi_1(t) \dots \phi_k(t)$ – заданные функции времени; $a_0 \dots a_k$ – коэффициенты регрессии.

Функции времени могут быть либо линейными, степенными, показательными или логарифмическими при монотонном тренде, либо тригонометрическими при циклическом и кусочно-постоянными при ступенчатом тренде. Во всех этих случаях параметры $a_0 \dots a_k$ оцениваются по имеющемуся ряду наблюдений $H_{\max_1} \dots H_{\max_n}$.

Результаты проведенных исследований закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды Припяти в створе Мозыря позволяют считать установленным наличие определенной связи стока смежных лет. Это служит основанием для описания годовых расходов воды в виде простой цепи Маркова, т. е.

$$H_{\max}(t) = r(1)H_{\max}(t-1) + \xi(t), \quad (9)$$

где $H_{\max}(t)$ – максимальный уровень воды текущего года; $H_{\max}(t-1)$ – максимальный уровень воды в предшествующий год; $\xi(t)$ – независимая от \bar{H}_{\max} случайная величина.

Первое слагаемое в правой части (9) можно трактовать как максимальный уровень воды, обусловленный зимними атмосферными осадками предшествующего года, аккумулированными бассейном реки, и сбросом их в русло в данном году. При этом случайная составляющая $\xi(t)$ в формуле (9), очевидно, должна включать в себя и ту часть максимального уровня воды текущего года, которая сформирована за счет зимних осадков этого года. В результате можно записать следующие уравнения [1]:

$$H(t) = aH(t-1) + bW_{\text{oc}}(t) + \xi(t_1), \quad (10)$$

$$H(t) = cW_{\text{oc}}(t-1) + dW_{\text{oc}}(t) + \xi(t_2), \quad (11)$$

где $W_{\text{oc}}(t)$ и $W_{\text{oc}}(t-1)$ – зимние осадки текущего и предшествующего годов соответственно.

Располагая временными рядами значений зимних атмосферных осадков и максимальными уровнями воды, коэффициенты a , b , c , d из формул (10) и (11) можно определить с помощью аппара-

та множественной регрессии. Применительно к бассейну Припяти в замыкающем створе Мозыря для максимальных уровней воды (см) получено уравнение

$$H(t) = 0,169H(t-1) + 0,081W_{oc}(t) + 367 + \xi(r_1). \quad (12)$$

Коэффициент множественной корреляции между стоком и определяющими факторами для уравнения (12) составляет $R = 0,26 > R^T_{(45,5\%)} = 0,24$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 22,7 % всех точек; $\pm 10\% - 34,8\%$; $\pm 15\% - 50,0\%$; $\pm 20\% - 60,6\%$.

$$H(t) = 0,137W_{oc}(t) + 0,944W_{oc}(t-1) - 9,173 + \xi(t_2). \quad (13)$$

Коэффициент множественной корреляции между стоком и определяющими факторами для уравнения (13) составляет $R = 0,42 > R^T_{(66,5\%)} = 0,24$, при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 25,8 % всех точек; $\pm 10\% - 39,4\%$; $\pm 15\% - 51,5\%$; $\pm 20\% - 59,1\%$.

Нами предпринята попытка описать колебания максимальных уровней воды Припяти с помощью сложной модели Маркова со сдвигом до 30 лет. Регрессионно-корреляционный анализ показал, что для построения модели могут использоваться $H(t-5)$, $H(t-8)$, $H(t-18)$, $H(t-23)$ и $H(t-29)$. Частный вид модели можно записать так:

$$\begin{aligned} H(t) = & 0,214H(t-5) + 0,138H(t-8) - 0,175H(t-18) + \\ & + 0,136H(t-5) + 0,205H(t-5) + 164 + \xi(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Коэффициент множественной корреляции для уравнения (14) составляет $R = 0,41 > R^T_{(110,5\%)} = 0,188$, $F = 3,43$ при этом в интервал $\pm 5\%$ попало 16,7 % всех точек; $\pm 10\% - 31,6\%$; $\pm 15\% - 40,4\%$; $\pm 20\% - 53,5\%$.

Заключение. Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик максимальных уровней воды р. Припять в створе г. Мозырь за 140-летний период позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике уровенного режима, обусловленных естественно-климатическими изменениями гидрологического цикла и антропогенными воздействиями. Стационарность процесса многолетних колебаний максимальных уровней воды Припяти возможно отмечать лишь на отдельных отрезках временного ряда. При анализе закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических.

Список использованных источников

- Исмайлов, Г. Х. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги / Г. Х. Исмайлов, В. М. Федоров // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 5. – С. 517–525.
- Логинов, В. Ф. Колебания годового воды р. Неман у г. Гродно / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33, № 6. – С. 635–663.
- Раткович, Д. Я. Многолетние колебания речного стока / Д. Я. Раткович. – Л. : Гидрометеоиздат, 1976. – 255 с.
- Мониторинг, использование и управление водными ресурсами бассейна р. Припять / под общ. ред. М. Ю. Калинина и А. Г. Ободовского. – Минск : Белсэнс, 2003. – 269 с.
- Природообустройство Полесья : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Рязань : Мещер. ф-л ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2018. – Кн. 1 : Белорусское Полесье. – Т. 1. – 408 с.
- Волчек, А. А. Автоматизация гидрологических расчетов / А. А. Волчек // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды : труды Междунар. науч.-практ. конф. / Брест. политехн. институт. – Биберах ; Брест ; Ноттингем, 1998. – С. 55–59.
- Волчек, А. А. К вопросу восстановления пропусков в гидрологических рядах наблюдений / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction : 9th Int. sci. and techn. conf., July 25–27, 2019. – Tbilisi, Georgia, 2019. – С. 296–300.
- Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск : Стройтехнорм, 2010. – 55 с.
- Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учеб. пособие / А. А. Волчек. – М. : КНОРУС, 2021. – 418 с.
- Статистические методы в природопользовании : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В. Е. Валуев [и др.]. – Брест : Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
- Логинов, В. Ф. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, П. С. Шведовский. – Брест : Изд-во БГТУ, 2004. – 301 с.
- Христофоров, А. В. Теория случайных процессов в гидрологии / А. В. Христофоров. – М. : Изд-во МГУ, 1994. – 141 с.

13. Логинов, В. Ф. Причины и следствия климатических изменений / В. Ф. Логинов. – Минск : Наука и техника, 1992. – 319 с.
14. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – Вып. 1. – 406 с.
15. Исследование общих эффектов вариаций стока рек / Любушина А. А. [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 7. – С. 76–84.

References

1. Ismajylov G. H., Fedorov V. M. *Analiz mnogoletnih kolebanij godovogo stoka Volgi* [Analysis of multi-year fluctuations in the annual flow of the Volga]. *Vodnye Resursy*, 2001, vol. 28, no. 5, pp. 517–525. (in Russian)
2. Loginov V. F., Volchek A. A. *Kolebaniya godovogo vody r. Neman u g. Grodno* [Fluctuations of the annual water flow of the Neman River near Grodno]. *Vodnye resursy*, 2006, vol. 33, no. 6, pp. 635–663. (in Russian)
3. Ratkovich D. Ya. *Mnogoletnie kolebaniya rechnogo stoka* [Multiyear fluctuations in river flow]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 255 p. (in Russian)
4. *Monitoring, ispol'zovanie i upravlenie vodnymi resursami bassejna r. Pripyat'* [Monitoring, use and management of water resources in the Pripyat River basin]. M. Yu. Kalinin and A. G. Obodovsky (ed.). Minsk, Belsens Publ., 2003, 269 p. (in Russian)
5. *Prirodoobustroystvo Poles'ya* [Environmental management in Polesie]. Yu. A. Mazhajsky [et al.] (ed.). Ryazan', 2018, book 1 : Belarusian Polesie, vol. 1, 408 p.
6. Volchek A. A. *Avtomatizaciya gidrologicheskikh raschetov* [Automation of hydrological calculations]. *Vodoohozajstvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhayushchej sredy : trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. Int. Sci.-Prac. Conf.]. Biberah ; Brest ; Nottingem, 1998, pp. 55–59.
7. Volchek A. A., Sidak S. V. *K voprosu vosstanovleniya propuskov v hidrologicheskikh ryadakh nablyudenij* [Towards the reconstruction of gaps in hydrological observation series]. 9th Int. Sci. and Techn. Conf. "Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction", July 25–27, 2019. Tbilisi, Georgia, 2019, pp. 296–300.
8. *Raschetnye hidrologicheskie harakteristiki. Poryadok opredeleniya. Tekhnicheskij kodeks ustano-vivshejsya praktiki TKP 45-3.04-168-2009(02250)* [Calculated hydrological characteristics. Procedures for determination. Technical Code of Established Practice TCP 45-3.04-168-2009(02250)]. Minsk, 2010, 55 p. (in Russian)
9. Volchek A. A. *Gidrologicheskie raschety* [Hydrological calculations]. Moscow, 2021, 418 p. (in Russian)
10. Valuev V. E., Volchek A. A., Pojta P. S., Shvedovskij P. V. *Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii* [Statistical methods in environmental management]. Brest, 1999, 252 p. (in Russian)
11. Loginov V. F., Volchek A. A., Shvedovskij P. S. *Praktika primeneniya statisticheskikh metodov pri analize i prognoze prirodnih processov* [Practicing statistical methods in the analysis and forecasting of natural processes]. Brest, 2004, 301 p. (in Russian)
12. Hristoforov A. V. *Teoriya sluchajnyh processov v hidrologii* [Random process theory in hydrology]. Moscow, 1994, 141 p. (in Russian)
13. Loginov V. F. *Prichiny i sledstviya klimaticeskikh izmenenij* [Causes and consequences of climate change]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1992, 319 p. (in Russian)
14. Boks Dzh., Dzhenkins G. *Analiz vremennyh ryadov, prognoz i upravlenie* [Time series analysis, forecasting and control]. Moscow, 1974, iss. 1, 406 p. (in Russian)
15. Lyubushina A. A., Pisarenko V. F., Bolgova M. V., Rukavishnikov T. A. *Issledovanie obshchih effektov variacij stoka rek* [Investigation of the overall effects of river flow variation]. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2003, no. 7, pp. 76–84. (in Russian)

Информация об авторах

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

Шпока Дарья Александровна – магистр технических наук, исследователь, ведущий специалист по организации учебного процесса, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: daryashpoka@rambler.ru

Information about authors

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

Darya A. Shpoka – Master of technical sciences, Researcher, Leading specialist in the organization of the educational process, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: daryashpoka@rambler.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-41-53>

УДК 556.531(476)

Поступила в редакцию 30.03.2023

Received 30.03.2023

РОЛЬ РЕЧНЫХ ПРОТОКОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕР НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «БРАСЛАВСКИЕ ОЗЕРА»

Н. Ю. Суховило, А. А. Новик

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Статья посвящена анализу гидрологического и гидрохимического режима речных проток между озерами национального парка «Браславские озера» и водоемов, которые они связывают. Актуальность исследования обусловлена не только важной экологической ролью проток, заключающейся в перераспределении стока, растворенных веществ и гидробионтов, но и недостаточной их изученностью.

Анализ состава воды десяти речных проток между озерами НП «Браславские озера» показал, что наиболее сильное влияние на гидрохимический режим расположенных ниже по течению озер оказывают протоки между озерами Святцо и Береже, Ельня Малая и Волосо Северный. Протока из гипертрофного озера Новято в озеро Дривиаты не оказывает существенного влияния на состав воды в последнем по причине большого объема воды и благоприятных условий для окисления загрязняющих веществ.

Ключевые слова: речная протока; озеро; водосбор; гидрохимический режим; антропогенное воздействие.

Для цитирования. Суховило Н. Ю., Новик А. А. Роль речных проток в формировании гидрохимического режима озер Национального парка «Браславские озера» // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 41–53.

ROLE OF STREAMS BETWEEN LAKES OF BRASLAV LAKES NATIONAL PARK IN FORMATION OF LAKES HYDROCHEMICAL REGIME

N. Yu. Sukhovilo, A. A. Novik

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The article describes the hydrological and hydrochemical regime of river channels between the lakes of the Braslav Lakes National Park and the lakes they connect. The relevance of the study is due not only to the important ecological role of the channels, which consists in the redistribution of runoff, dissolved matters and aquatic organisms, but also to insufficient knowledge about them.

An analysis of the water composition of ten river channels between the lakes of the Braslav Lakes National Park showed that the channels between the lakes Svyatso and Berezhe, Yelnya Malaya and Voloso Severny have the strongest influence on the hydrochemical regime of the downstream lakes. The channel from the hypertrophic Lake Noviato to Lake Driviatiy does not have a significant effect on the composition of the water in Lake Driviatiy due to the large volume of water and favorable conditions for the oxidation of pollutants.

Keywords: river channel; lake; catchment; hydrochemical regime; anthropogenic impact.

For citation. Sukhovilo N. Yu., Novik A. A. Role of streams between lakes of Braslav Lakes National Park in formation of lakes hydrochemical regime. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 41–53.

Введение. Межозерные речные протоки играют важную экологическую роль в жизни водоемов. Они не только выполняют функции водообмена, но и участвуют в перераспределении взвешенных и растворенных веществ, служат путями миграции гидробионтов, что позволяет поддерживать оптимальную численность их популяций. Поэтому такие водные объекты нуждаются в охране, рациональном использовании ресурсов и правильном управлении. Однако процесс управления невозможен без предварительной оценки современного состояния озер и речных проток, а также анализа степени антропогенного воздействия на них.

Большое значение в предотвращении загрязнения, сохранении ландшафтного и биологического разнообразия Беларуси принадлежит особо охраняемым природным территориям (ООПТ). Наиболее

репрезентативно в составе ООПТ представлены лесные и водные экосистемы, на основе которых формируются естественные экологические ядра и коридоры. Поэтому изучение экологического состояния речных проток между озерами в пределах ООПТ позволяет выявить направления и особенности обмена видовым составом, влияющего на биологическое разнообразие озерных экосистем. Несмотря на важность исследования гидрохимического режима речных проток между озерами, изучен он слабо. Пробы воды из отдельных проток отбирали при паспортизации озер, однако системность при этом отсутствовала.

Цель работы – провести анализ влияния гидрологического и гидрохимического режимов речных проток между озерами НП «Браславские озера» на состав воды в расположенных ниже по течению озерах.

Материалы и методы исследования. В рамках данного исследования были изучены десяти речных проток между озерами Браславской группы. Это протоки между озерами Струсто и Ельно, Струсто и Войсо, Святцо и Береже, Волосо Северный и Снуды, система проток между озерами Плутинок-Болойсо и Плутинок-Войсо, Ельня Малая и Волосо Северный, Снуды и Островиты, Снуды и Войты, Новято и Дривяты. Картосхема расположения исследованных проток представлена на рис. 1. Основные морфометрические характеристики и параметры водосборов проток приведены в табл. 1.



Рис. 1. Картосхема расположения объектов исследования

Fig. 1. Map of the location of studied lakes

Таблица 1. Морфометрические характеристики речных проток между озерами и их водосборов [1]**Table 1. Morphometric characteristics of river channels between lakes and their catchments [1]**

Протока между озерами	Длина, м	Ширина, м	Глубина воды в створе измерения, м		Площадь водосбора, км ²
			средняя	максимальная	
Ельно – Струсто	250	7,0–9,0	0,45	0,62	14,0
Струсто – Войсо	400	10,5–100,0	1,47	1,96	223,0
Плутинок – Войсо	60	6,0–7,0	0,48	0,57	1,0
Плутинок – Болойсо	290	2,0–10,0	0,60	1,20	–
Святцо – Береже	150	10,0–11,0	0,51	0,81	2,8
Новято – Дривяты	280	1,35–10,0	0,19	0,24	4,5
Островиты – Снуды	1300	1,0–1,5	0,10	0,20	3,7
Войты – Снуды	700	0,7–3,0	0,29	0,44	4,1
Волосо Северный – Снуды	1100	5,0–7,0	0,62	0,67	13,9
Ельня Малая – Волосо Северный	1900	1,0–12,0	0,13	0,20	2,2

Исходными материалами для проведения исследования послужили результаты полевых исследований, фондовые данные научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) озероведения, картографические материалы из открытых источников. Основные методы исследования: экспедиционный, лабораторный, системного анализа, синтеза, сравнительно-географический, эколого-географический, методы математической статистики, ГИС-методы.

Измерение расхода воды в протоках проводили в период весеннего половодья (19–20.04.2021) и летней межени (11–12.08.2021) согласно общепринятой методике гидрометрических наблюдений и измерений [2–4] с использованием водомерной рейки ГР-104 и гидрометрической вертушки МКРС (расходомер-скоростемер микрокомпьютерный).

Одновременно с измерением расходов производили отбор пробы воды для гидрохимического анализа, а также отбирали пробы фитопланктона, зоопланктона и зообентоса в соответствии с общепринятыми методиками.

Отбор проб воды в речных протоках в период весеннего половодья для анализа ее химического состава осуществляли в случаях, если их истоками служили антропогенно нарушенные озера или не исключалась возможность их пересыхания в летнюю межень. Летом пробы воды отбирали во всех протоках. Помимо этого, для анализа химического состава воды в протоках использовали фондовые данные НИЛ озероведения и справочные материалы [5–9].

Анализ проб воды осуществляла Г. М. Бокая в лаборатории Института природопользования НАН Беларуси. В ходе анализа определяли такие показатели, как минерализация воды, концентрация главных ионов, минеральных форм азота и фосфора, железа общего, цветность, pH (дополнительно с помощью pH-метра Hanna Instruments проводили его измерение в ходе полевых исследований).

Результаты и их обсуждение. Гидрологический режим межозерных речных проток Браславской озерной группы во многом определяется физико-географическими особенностями водосборной территории бассейна реки Друйка. В первую очередь это касается показателя озерности, который для территории всего национального парка составляет более 18 %. Озера, являясь важными природными регуляторами, перераспределяют часть весеннего стока на маловодный летне-осенний период, сглаживая пики гидрографов для участков весеннего половодья. Не менее важными показателями, влияющими на характер перераспределения стока с весенного многоводного на летне-осенний минимальный, являются показатели лесистости и заболоченности, которые для территории национального парка составляют 67,4 и 4,4 % соответственно. Вместе с тем низкие значения показателей густоты эрозионной сети (около 1 км/км²) и степени распаханности водосборов (не более 10 %) в пределах национального парка также не способствуют резкому увеличению расходов проток в период весеннего половодья.

Выбор дат измерения обусловливает то обстоятельство, что пик половодья на Браславских озерах по данным прошлых лет припадает на последнюю декаду апреля. Об этом свидетельствуют данные измерения уровня воды в озере Дривяты, а также опросы местных жителей, проведенные в период гидрометрических работ. Летние даты измерения соответствуют меженному периоду в данном регионе. В ходе летнего полевого обследования в отдельных створах на низкие меженные наложились летние паводочные уровни, связанные с выпадением обильных осадков на водосборах озер. Гидрометрические характеристики поперечных профилей исследуемых проток и результаты измерения расходов воды для весеннего и летнего периодов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Значения параметров гидрометрических измерений в речных протоках между озерами НП «Браславские озера» в период весеннего половодья [9]**Table 2. Values of the parameters of hydrometric measurements in the river channels between the lakes of the Braslav Lakes National Park during the spring flood [9]**

Протока между озерами	Дата измерения	Ширина в створе измерения (B), м	Глубина воды (H), м		Скорость течения воды (V), м/с		Площадь водного сечения, (F), м ²	Расход воды (Q), м ³ /с
			средняя	максимальная	средняя	максимальная		
Ельно – Струсто	19.04.2021	5,45	0,45	0,62	0,023	0,055	2,44	0,0567
Струсто – Войко	20.04.2021	10,50	1,47	1,96	0,032	0,049	15,48	0,4871
Плутинок – Войко	20.04.2021	0,98	0,48	0,57	0,061	0,082	0,47	0,0288
Плутинок – Болойко	20.04.2021	6,00	–	–	–	–	–	–
Святцо – Береже	19.04.2021	10,00	0,51	0,81	–	–	5,14	–
Новято – Дривяты	19.04.2021	1,35	0,19	0,24	0,124	0,255	0,26	0,0326
Островиты – Снуды	20.04.2021	1,20	0,10	0,20	0,322	0,345	0,12	0,0386
Войты – Снуды	20.04.2021	2,74	0,29	0,44	0,099	0,163	0,79	0,0786
Волосо Северный – Снуды	20.04.2021	0,89	0,62	0,67	0,118	0,146	0,62	0,0732
Ельня Малая – Волосо Северный	20.04.2021	1,00	0,13	0,20	0,158	0,140	0,13	0,0179

Таблица 3. Значения параметров гидрометрических измерений в речных протоках между озерами НП «Браславские озера» в период летней межени [9]**Table 3. Values of the parameters of hydrometric measurements in the river channels between the lakes of the Braslav Lakes National Park during the summer low water period [9]**

Протока между озерами	Дата измерения	Ширина в створе измерения (B), м	Глубина воды (H), м		Скорость течения воды (V), м/с		Площадь водного сечения, (F), м ²	Расход воды (Q), м ³ /с
			средняя	максимальная	средняя	максимальная		
Ельно – Струсто	12.08.2021	5,0	0,17	0,38	0	0	0,85	0
Струсто – Войко	12.08.2021	11,4	1,21	2,02	0,143	0,176	13,863	1,987
Плутинок – Войко	12.08.2021	0,8	0,48	0,57	0	0	0,47	0
Плутинок – Болойко	12.08.2021	5,0	0,20* 1,00**	0,30* 1,50**	–	–	–	–
Святцо – Береже	12.08.2021	10,0	0,51	0,81	0	0	5,14	0
Новято – Дривяты	12.08.2021	1,35	0,19	0,24	0,042	0,0495	0,42	0,0177
Островиты – Снуды	11.08.2021	0,64	0,08	0,13	0,074	0,0894	0,0512	0,0038
Войты – Снуды	11.08.2021	3,6	0,18	0,33	0,011	0,027	0,68	0,0078
Волосо Северный – Снуды	11.08.2021	0,90	0,44	0,61	0,069	0,087	0,398	0,0273
Ельня Малая – Волосо Северный	11.08.2021	0,6	0,02	0,02	0,03	0,03	0,012	0,00036

* Со стороны озера Болойко.

** Со стороны озера Плутинок.

На основании анализа полученных морфометрических данных выявлено, что максимальную площадь живого сечения среди исследуемых водных объектов имеет протока Струсто – Войсо, где площадь водного сечения в весенний период составила $15,48 \text{ м}^2$, при максимальной ширине до 11,6 м и максимальной глубине 1,96 м. Минимальная площадь поперечного сечения отмечена в летний период у протоки Ельня Малая – Волосо Северный и составила $0,012 \text{ м}^2$, что видно из рис. 2.

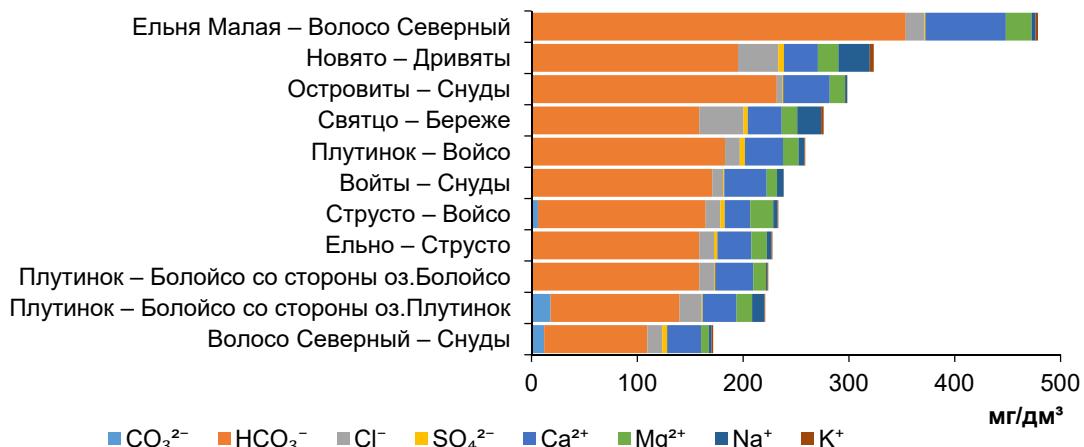


Рис. 2. Ионный состав воды в речных протоках между озерами Браславской группы в период летней межени

Fig. 2. The ionic composition of water in the river channels between the lakes of the Braslav group during the summer low water period

Максимальные скорости течения на исследуемых протоках в среднем составляют около 0,1 м/с, достигая максимума 0,345 м/с в весенний период на участке между озерами Островиты и Снуды, а в короткой и достаточно широкой протоке между озерами Святцо и Береже скорость течения во время полевых исследований была равна нулю. Это объясняется незначительным перепадом уровней воды между озерами либо их полным отсутствием.

Как видно из табл. 2 и 3, измеренные расходы воды во всех протоках характеризуются достаточно низкими показателями, причем даже в период весеннего половодья, что объясняется малыми площадями поперечных сечений и незначительными скоростями течений.

Сравнительный анализ расходов воды весеннего и летнего периодов между протоками озерной группы показал падение уровней воды и снижение расходов вплоть до полного прекращения движения воды, за исключением протоки между озерами Струсто и Войсо. В последнем случае причина увеличения интенсивности стока с $0,4871 \text{ м}^3/\text{с}$ при весеннем измерении до $1,987 \text{ м}^3/\text{с}$ при летнем измерении объясняется обильными локальными ливневыми осадками, выпавшими в период проведения измерений на водосборах озер Снуды и Струсто, относящимися территориально к верховьям водосбора озера Войсо.

На протоках, соединяющих озера Новято – Дривяты, Островиты – Снуды, Войты – Снуды, Волосо Северный – Снуды отмечено снижение расхода воды с $0,0326$; $0,0386$; $0,0786$ и $0,0732 \text{ м}^3/\text{с}$ (при весеннем измерении) до $0,0176$; $0,0038$; $0,0078$ и $0,0273 \text{ м}^3/\text{с}$ (при летнем измерении) соответственно, что связано с отсутствием поверхностного снегового питания, увеличением испарения в летний период, а также наличием высшей водной растительности, уменьшающей площадь живого сечения проток.

На протоке между озерами Ельня Малая – Волосо Северный отмечено наиболее значительное снижение расхода воды – с $0,0179 \text{ м}^3/\text{с}$ при весеннем измерении до $0,00036 \text{ м}^3/\text{с}$ при летнем измерении что объясняется низким приходным летним балансом озера Ельня Малая в связи с малой водосборной территорией данного озера.

В протоках между озерами Ельно – Струсто (весенний расход – $0,0567 \text{ м}^3/\text{с}$) и Плутинок – Войсо (весенний расход – $0,0288 \text{ м}^3/\text{с}$) течение воды в летнюю межень отсутствовало и, соответственно, расход равнялся нулю. При этом летний уровень воды в самих протоках незначительно отличался от весеннего. Отсутствию летних меженных расходов на этих протоках способствуют малые перепады высот между озерами, а также незначительные площади водосборных территорий выше расположенных озер, имеющих преимущественно поверхностный характер питания, что отражается на наличии расходов в соединяющих протоках только в периоды весеннего снеготаяния и при выпадении дождевых осадков.

Протока между озерами Святцо и Береже фактически представляет собой искусственную канаву на месте бывшего ручья шириной около 10 м при длине 140 м, в которой отсутствует движение воды во все сезоны года из-за выравнивания уровней воды между двумя озерами после создания канавы.

На искусственной протоке, соединяющей озера Плутинок и Болойсо, была создана заградительная земляная дамба, которая перекрыла гидрологическую связь между двумя озерами, существовавшую в прошлом, поэтому в настоящее время сток воды из одного озера в другое также отсутствует.

Анализ полученных данных позволил выявить ряд закономерностей в изменении расходов воды изучаемых проток. Определяющими факторами, влияющими на величины расходов, играют площади водосборов вышерасположенных озер, наличие или отсутствие значительных уклонов водной поверхности между соседними озерами, степень многоводности или маловодности весенне-летнего сезона, обусловленного зимними снегозапасами и дождевыми осадками, а также характер и интенсивность летнего зарастания.

Структура водосборов озер и самих проток оказывают непосредственное воздействие на их гидрохимический режим. Вода всех проток, кроме протоки Струсто – Войсо, по своему гидрохимическому составу относится к характерному для гумидной зоны гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Вода протоки между озерами Струсто и Войсо относится к гидрокарбонатному классу магниевой группы, что связано с изъятием кальция харовыми водорослями в период их активной вегетации. Однако в ионном составе присутствуют некоторые различия, вызванные как структурой водосборной территории, так и характером ее хозяйственного использования. Минерализация воды изменяется от 172,1 мг/дм³ в протоке между мезотрофными озерами Волосо Северный и Снуды до 484,7 мг/дм³ в протоке между озерами Ельня Малая и Волосо Северный, как показано на рис. 2.

В протоках, вытекающих из гипертрофных озер Новято и Святцо, высокая концентрация хлорид-ионов и натрия, что является индикатором трансформации химического состава воды под воздействием антропогенного фактора.

Из-за наличия на водосборе локальных источников вредного воздействия гидрохимический режим проток между озерами Святцо и Береже, Новято и Дривяты, Ельня Малая и Волосо Северный подвержен техногенному преобразованию. Это выражается как в сильных колебаниях общей минерализации, так и в структуре ее компонентов. В протоке Святцо – Береже весной ее значение составило 485,5 мг/дм³, летом оно снизилось до 277,34 мг/дм³. Во время весеннего половодья, вызванного снеготаянием, и сноса с улиц и дворов г. Браслава песчано-солевой смеси, вода протоки Святцо – Береже по своему химическому составу соответствовала гидрокарбонатному классу натриевой группы, что для условий Беларуси не характерно. Доля гидрокарбонат-иона в это время равна 33 %-экв., натрия – 21, кальция – 16, хлорид-иона – 15, магния – 12, калия – 2, сульфат-иона – 1 %-экв. Летом происходит постепенный возврат состава вод к зональному гидрокарбонатному классу кальциевой группы, но высокий удельный вес хлорид-ионов и ионов натрия (15 и 13 %-экв. соответственно) сохраняется. Доля гидрокарбонат-иона существенно не меняется, кальция – возрастает до 21 %-экв., магния – до 15 %-экв. Аналогичные особенности гидрохимического режима характерны для протоки, вытекающей из озера Новято в озеро Дривяты. Поступление в озеро Новято сточных вод приводит к тому, что минерализация воды в протоке в летнюю межень составила 324,34 мг/дм³. Весной, в период снеготаяния и сноса с водосбора песчано-солевой смеси, она повышалась до 425,8 мг/дм³. Из рис. 2 видно, что весной состав воды в протоке следует классифицировать как гидрокарбонатно-натриевый с долей гидрокарбонат-иона 36 %-экв. и ионов натрия 19 %-экв., летом доля гидрокарбонатов остается практически неизменной, но преобладающие катионы меняются. Соотношение магния и кальция в воде в это время примерно равно (отличается на 0,04 %-экв.), доля натрия снижается до 14 %-экв., но нарушения гидрохимического режима проявляются достаточно сильно. Доля хлоридов колеблется в узких пределах, но их концентрация меняется от 38,2 мг/дм³ летом до 45,6 мг/дм³ весной. Доля сульфатов и калия изменяется в пределах 1–2 %-экв.

Протока Ельня Малая – Волосо Северный характеризуется максимальной из всех обследованных водотоков концентрацией растворенных веществ. Общая минерализация воды в августе составила 484,7 мг/дм³. Весной, когда в озере Ельня Малая и протоку поступали талые снеговые воды, она была несколько ниже – 363,4 мг/дм³. При этом в течение года наблюдаются существенные различия в структуре компонентов минерализации, как показано на рис. 2. Весной на гидрокарбонат-ион приходилось 42 %-экв., летом его доля возросла до 47 %-экв. Само содержание гидрокарбонатов меняется почти на 100 мг/дм³ – от 256,2 до 353,6 мг/дм³. Более высокое содержание ионов натрия и хлоридов в половодье (7 и 6 %-экв. весной против 1 и 4 %-экв. летом соответственно) свидетельствует об использовании песчано-солевых смесей на дорогах и последующем их сносе с водосбора в озеро Ельня Малая и протоку. Колебания концентраций кальция (54,30–76,15 мг/дм³) и магния (16,50–24,20 мг/дм³) менее значительны. Колебания относительного содержания главных ионов в воде проток отражает рис. 3.

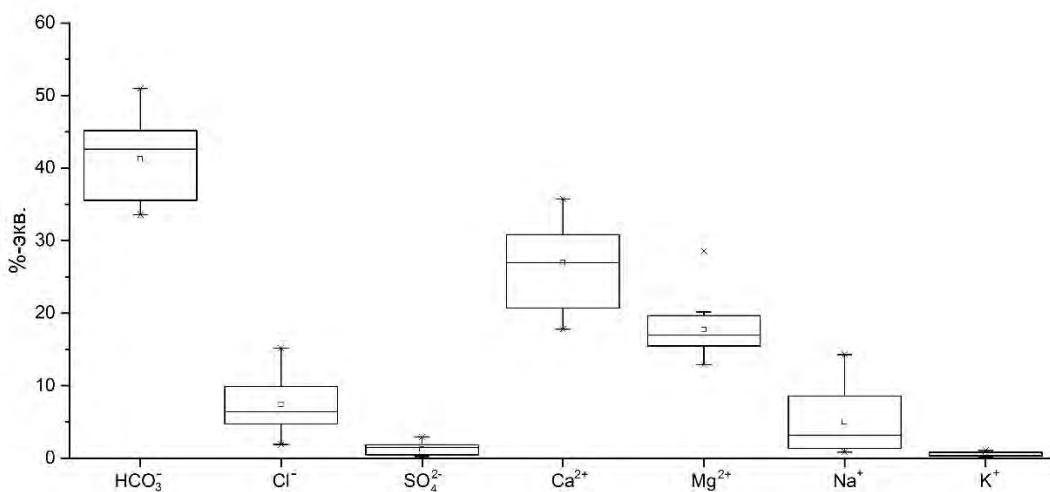


Рис. 3. Относительное содержание компонентов минерализации в протоках между озерами Braslavской группы, %-экв.

Fig. 3. Relative content of mineralization components in the channels between the lakes of the Braslav group, %-eq.

Ненарушенным гидрохимическим режимом характеризуются протоки между озерами Волосо Северный и Снуды, Струсто и Войсо, Ельно и Струсто.

Вода в протоке Струсто – Войсо относится к гидрокарбонатному классу магниевой группы. Соотношение между компонентами минерализации можно выразить в виде $\text{HCO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- \geq \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-}$. Преобладание ионов магния над ионами кальция свидетельствует об активном питании озера Струсто подземными водами и изъятии ионов кальция харовыми водорослями и высшей водной растительностью. Минерализация воды в летний период составила 233,83 мг/дм³. На гидрокарбонат-ионы приходится 40 %-экв., ионы магния – 28, ионы кальция – 19, хлорид-ионы – 6, ионы натрия – 3, карбонат-ионы – 3, сульфат-ионы – 2 %-экв. Такая ионная структура свидетельствует о естественном состоянии протоки и отсутствии значительного антропогенного воздействия. Преобладание ионов магния над ионами кальция можно объяснить изъятием последнего харовыми водорослями и рдестами. Кроме этого, высокое содержание магния характерно для водных объектов с интенсивным подземным питанием, к которым относится озеро Струсто.

Протока Волосо Северный – Снуды отличается минимальной из всех исследованных объектов минерализацией воды – 172,9 мг/дм³. По 33 %-экв. в структуре ее компонентов занимают ионы кальция и гидрокарбонаты. Высокая доля кальция связана с тем, что озеро Волосо Северный, служащее истоком протоки, является водоемом-карбонатонакопителем. 12 %-экв. приходится на ионы магния, 8 %-экв. – на хлориды. Однако невысокая доля ионов натрия и калия (2 и 1 %-экв. соответственно) свидетельствует о поступлении хлоридов в озеро Волосо Северный из подземных вод, а не о техногенном засолении.

Минерализация воды в протоке Ельно – Струсто в августе 2021 г. была равна 228,31 мг/дм³, а соотношение главных ионов являлось индикатором сохранения естественного гидрохимического режима. Из них на гидрокарбонат-ион приходилось 43 %-экв., ионы кальция – 26, ионы магния – 20, хлорид-ионы – 6, ионы натрия – 3 %-экв. Сульфат-ион в структуре компонентов минерализации занимал 2 %-экв., на ионы калия приходилось менее 1 %-экв.

Существенно различается также концентрация биогенных элементов в воде проток, что иллюстрирует рис. 4. Максимальная концентрация нитрат-, фосфат- и аммоний-иона также характерна для проток Ельня Малая – Волосо Северный. Например, содержание аммоний-иона летом 2021 г. в 10 раз превышало предельно допустимую концентрацию для поверхностных вод. Причиной этого является, по-видимому, сброс сточных вод из канализации д. Быстромовцы с территории бывших складов удобрений, а также снос сельскохозяйственных угодий.

Возможно, аналогичная ситуация складывается на протоке из озера Войты в озеро Снуды. Источником биогенных элементов там может служить подворье дома 46 по ул. Приозерная в д. Красногорка.

Максимальное количество биогенных элементов отмечено в протоке Ельня Малая – Волосо Северный, минимальное – в протоках Ельно – Струсто, Струсто – Войсо и Волосо Северный – Снуды.

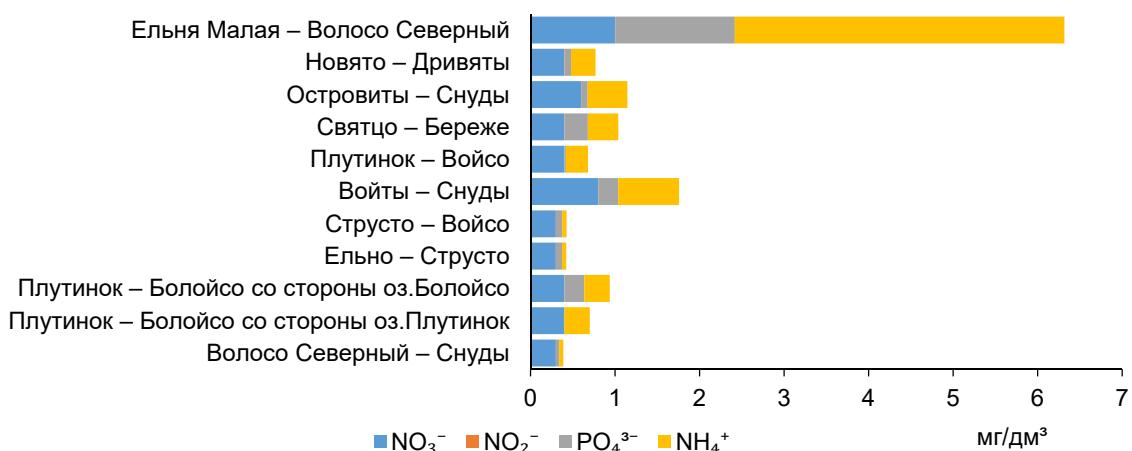


Рис. 4. Содержание биогенных элементов в воде речных проток между озерами Braslavской группы в период летней межени [10]

Fig. 4. Concentration of biogenic elements in the water of the river channels between the lakes of the Braslav group during the summer low water period [10]

Содержание нитрат-иона в воде протоки Ельня Малая – Волосо Северный летом составило 0,135 мг/дм³, весной оно было значительно выше – 0,900 мг/дм³, что может быть связано с притоком болотных вод, обогащенных нитратами, с водосбора. Нитрит-ионы отсутствовали как весной, так и летом. Ионы NH_4^+ отмечены только в весенний период, когда их концентрация находилась на уровне 0,36 мг/дм³. Такие значительные колебания концентраций биогенных элементов свидетельствуют о нестабильности гидрохимического режима озера и протоки.

В протоках, вытекающих из гипертрофного озера Новято, концентрация фосфатов в летний период остается низкой по причине активного их потребления фитопланктоном и макрофитами. В то же время фосфорная нагрузка на озере Святцо превышает возможности экосистемы по потреблению фосфора, поэтому его содержание в воде протоки остается высоким – 0,276 мг/дм³. Также следует отметить высокие концентрации биогенных элементов в воде проток, вытекающих из озер Войты и Островиты, источники поступления которых не выявлены. Если в первом случае возможно поступление биогенов с подворий д. Красногорка, то во втором наиболее вероятен приток с сельхозугодий водосбора озера Островиты, так как жилые дома и сельскохозяйственные земли в непосредственной близости от протоки отсутствуют.

Концентрация биогенных элементов в воде протоки Ельно – Струсто одна из самых низких. Цветность воды также низкая (17°). Концентрация нитрат-иона равна 0,3 мг/дм³ (в пересчете на азот нитратный – 0,068 мгN/дм³), нитрит-иона – ниже чувствительности метода определения, аммоний-иона – 0,05 мг/дм³, фосфат-иона – 0,071 мг/дм³ (0,023 мгP/дм³).

Низкие концентрации биогенных элементов в воде протоки Волосо Северный – Снуды свидетельствуют о чистоте воды. Содержание нитрат-иона – 0,3 мг/дм³ (0,068 мгN/дм³). Концентрация нитрит-иона ниже чувствительности метода, фосфат-иона – 0,037 мг/дм³ (в пересчете на фосфор фосфатный – 0,012 мгP/дм³).

Содержание биогенных элементов в речной протоке из озера Струсто в озеро Войсо также соответствует таковому в чистых водных объектах. Концентрация нитрат-иона равна 0,3 мг/дм³ (0,068 мгN/дм³), нитрит-иона – ниже чувствительности метода определения, аммоний-иона – 0,05 мг/дм³, фосфат-иона – 0,074 мг/дм³ (0,024 мгP/дм³).

Показатели цветности воды в протоках и водородного показателя приведены на рис. 5.

Наиболее низкие показатели цветности (12°–15°) характерны для проток, вытекающих из мезотрофных озер Волосо Северный и Струсто, наиболее высокие (84°–128°) – для проток, вытекающих из озер с заболоченными водосборами (Войты, Островиты) или озер, подверженных антропогенному воздействию (Ельня Малая, Новято) [11].

Величина водородного показателя колеблется от 7,2–7,3 в протоках, вытекающих из озер Островиты и Снуды, имеющих заболоченные водосборы, до 8,4 в протоке Плутинок – Болойсо у дамбы со стороны озера Плутинок.

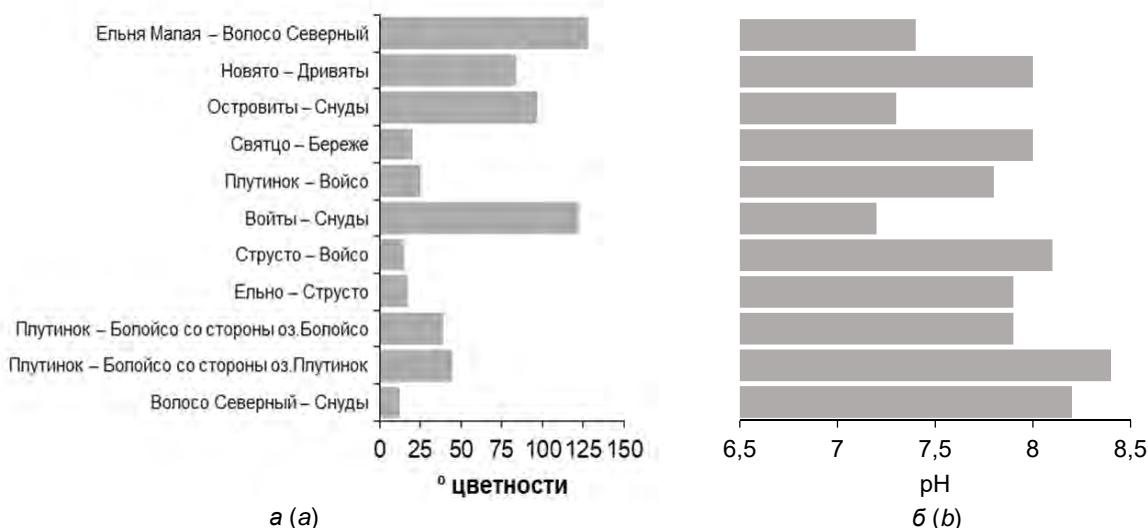


Рис. 5. Цветность (а) и водородный показатель (б) воды в протоках между озерами Браславской группы в период летней межени

Fig. 5. Color (a) and pH (b) of water in the channels between the lakes of the Braslav group during the summer low water period

Из всего вышесказанного следует, что наиболее благоприятный гидрохимический режим наблюдается в протоках Ельно – Струсто, Струсто – Войсо. Химический состав воды в протоках Ельня Малая – Волосо Северный, Новято – Дривяты и Святцо – Береже из-за наличия на их водосборах локальных и рассеянных источников загрязнения сильно трансформирован.

В ходе исследования установлены основные особенности водообмена между протоками, которые находят свое отражение в миграции растворенных веществ.

Наиболее активно загрязняющие вещества мигрируют по протокам из озера Святцо в озеро Береже, из озера Ельня Малая в озеро Волосо Северный, из озера Войты в озеро Снуды, из озера Новято в озеро Дривяты. При этом если протока вытекает из гипертрофного озера, а впадает в эвтрофное, она служит своеобразной буферной зоной между ними. Для выявления динамики содержания растворенных веществ при движении от вышележащего озера к нижележащему анализировали концентрации главнейших ионов (компонентов минерализации) и ионов биогенных элементов на примере проток, вытекающих из антропогенно нарушенных озер Святцо и Новято, озера Ельно, нагрузка на которое не столь высока, и озера Волосо Северный, отличающегося минимальным воздействием на его экосистему.

Изменение концентрации главных ионов и биогенных элементов в протоке Святцо – Береже и озерах, которые она соединяет, показано на рис. 6.

На диаграмме видно, что содержание фосфатов и нитратов снижается при движении от озера Святцо к озеру Береже. Высокое содержание аммоний-иона в протоке свидетельствует о загрязнении им непосредственно вод протоки и о недостатке растворенного кислорода в воде.

Менее заметно это на примере компонентов минерализации, однако уменьшение доли ионов натрия, являющегося признаком загрязнения озерных вод, выражено достаточно сильно.

Аналогично изменяется минерализация воды в протоке Новято – Дривяты и озерах, которые она соединяет. Однако динамика концентраций биогенных элементов в рассматриваемом «каскаде» отличается, что иллюстрирует рис. 7.

В протоке отмечена максимальная из всех трех водных объектов концентрация биогенов, а также здесь зафиксирована существенная неоднородность в ее соотношении. В воде озера Новято практически отсутствует фосфат-ион, что связано с его потреблением фитопланктоном. В протоке его концентрация повышается до $0,077 \text{ мг}/\text{дм}^3$, в озере Дривяты она достигает $0,117 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Содержание нитратов закономерно убывает при движении от озера Новято к озеру Дривяты. Максимальная концентрация аммоний-иона отмечена именно в протоке, поэтому можно предположить, что сточные воды с близлежащих подворий попадают в нее. Поскольку озеро Дривяты из-за большого объема водной массы хорошо справляется с биогенной нагрузкой, значительный ущерб его экосистеме озеро Новято не наносит, но прекращение поступления неочищенных сточных вод позволило бы улучшить экологическое состояние озера.

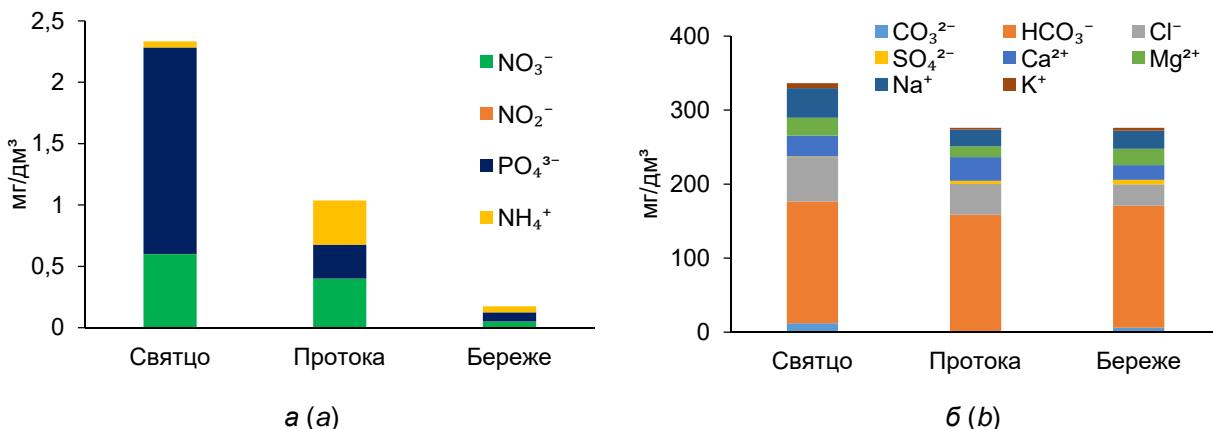


Рис. 6. Изменение концентрации биогенных элементов (а) и главных ионов (б) в «каскаде» озеро Свяцто – протока – озеро Береже

Fig. 6. Change in the concentration of biogenic elements (a) and main ions (b) in the "cascade" of Lake Svyattso – channel – Lake Berezhе

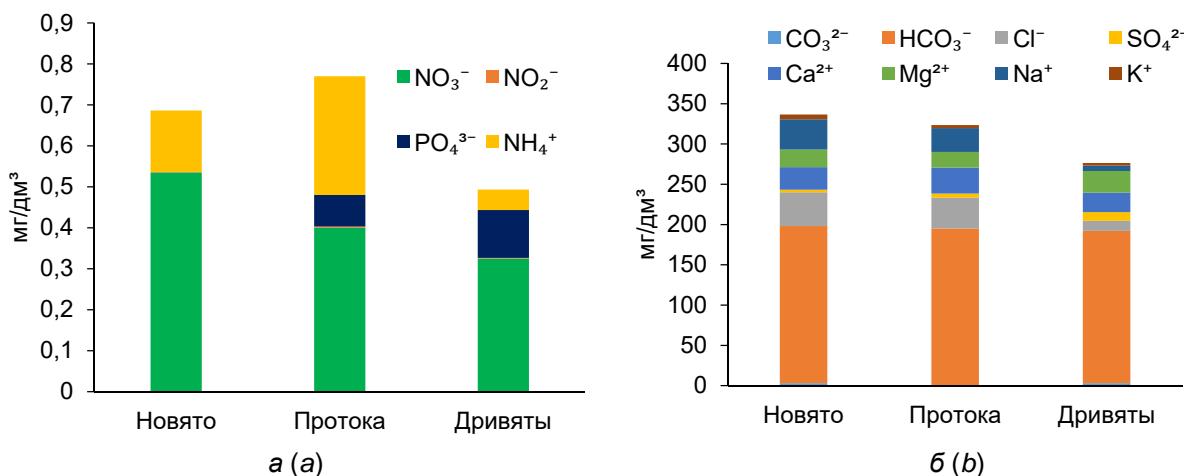


Рис. 7. Изменение концентрации биогенных элементов (а) и главных ионов (б) в «каскаде» озеро Новято – протока – озеро Дривяты

Fig. 7. Change in the concentration of biogenic elements (a) and main ions (b) in the "cascade" of Lake Novyato – channel – Lake Driviaty

Несколько иная ситуация наблюдается в протоках и озерах со слабым антропогенным воздействием. Так, в протоке Ельно – Струсто, по сравнению с озерами, минерализация самая низкая, а концентрация биогенных элементов наиболее высокая, как показано на рис. 8. Рост содержания фосфатов может быть обусловлен притоком вод с сельскохозяйственных угодий, а также менее интенсивным, по сравнению с озерами, их потреблением водной растительностью и фитопланктоном.

Концентрации нитратов и аммоний-ионов во всех трех водных объектах отличается незначительно.

В «каскаде», состоящем из мезотрофных озер Волосо Северный и Снуды, а также протоки между ними, наблюдается распределение растворенных веществ, показанное на рис. 9. Из него видно, что минерализация воды возрастает при движении от озера Волосо Северный к озеру Снуды. При этом заметных нарушений химического состава воды не выявлено, за исключением небольшого повышения концентрации хлорид-иона в протоке, что может быть связано с близостью туристической стоянки «Ручей» от места отбора пробы воды. Более высокая минерализация воды в озере Снуды обусловлена большим количеством впадающих в него водотоков, которые и приносят растворенные вещества. Относительно высокая концентрация нитратов в протоке объясняется тем, что в ней почти нет фитопланктона и высшей водной растительности, фиксирующих соединения азота.

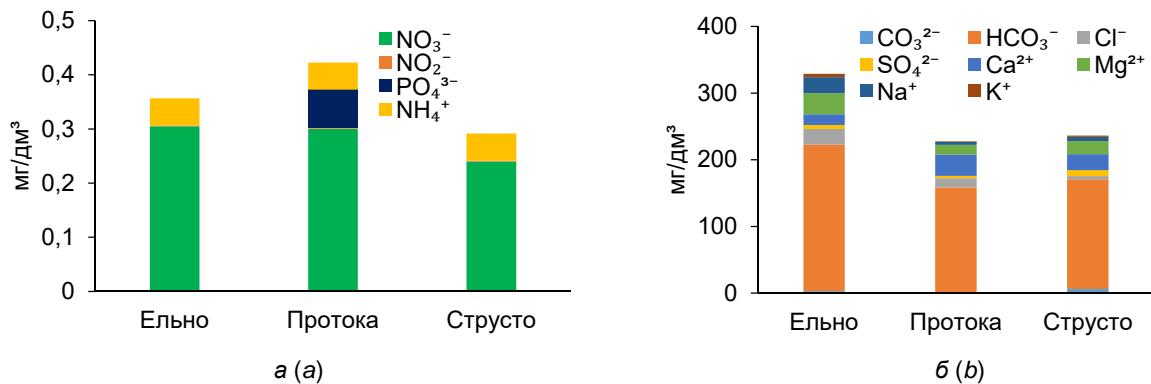


Рис. 8. Изменение концентрации биогенных элементов (а) и главных ионов (б) в «каскаде» озеро Ельно – протока – озеро Струсто

Fig. 8. Change in the concentration of biogenic elements (a) and main ions (b) in the "cascade" of Lake Yelno – channel – Lake Strusto

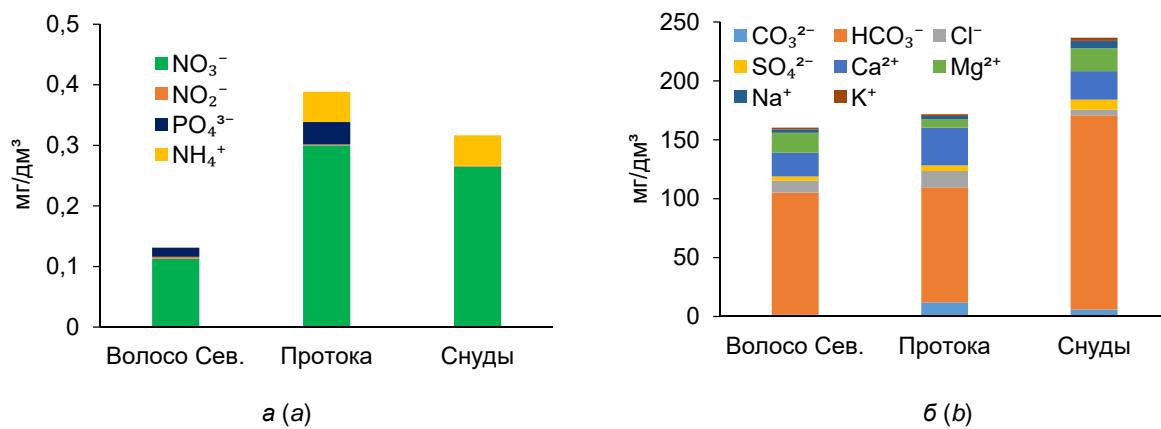


Рис. 9. Изменение концентрации биогенных элементов (а) и главных ионов (б) в «каскаде» озеро Волосо Северный – протока Волосо Северный – Снуды – озеро Снуды

Fig. 9. Change in the concentration of biogenic elements (a) and main ions (b) in the "cascade" of Lake Voloso Severny – channel – Lake Snudy

Заключение. Из всего вышесказанного следует, что наиболее благоприятный гидрохимический режим наблюдается в протоках Ельно – Струсто, Струсто – Войко, химический состав воды в протоках Ельня Малая – Волосо Северный, Новято – Дривяты и Святцо – Береже из-за наличия на их водосборах локальных и рассеянных источников загрязнения сильно трансформирован. Однако озеро Дривяты с ней справляется из-за большого объема воды, озеро Береже имеет черты гидробиологического режима, свойственные высокопродуктивным водоемам. Наиболее опасно попадание биогенных элементов для глубокого мезотрофного озера Волосо Северный. Гидрохимический анализ проб воды из проток показал, что происходит вынос загрязненных вод из озер Святцо, Новято, Плутинок, Ельня Малая в водоемы, расположенные ниже по течению. И если экосистемы озер Дривяты и Войко, обладая большим объемом воды либо высокой проточностью, способны справиться с биогенной нагрузкой, то озера Береже и особенно Волосо Северный более уязвимы к антропогенному воздействию. Озеро Береже имеет черты гидробиологического режима, свойственные высокопродуктивным водоемам. Более опасно попадание биогенных элементов для глубокого мезотрофного озера Волосо Северный.

Поэтому для предотвращения деградации экосистем озер рекомендуется прекращение сброса неочищенных сточных вод путем создания закрытых систем канализации либо строительства локальных очистных сооружений в д. Быстровицы, а также перенаправление всех сточных вод с территории г. Браслава на очистные сооружения.

Рекомендуется также создать биоплато на протоке между озерами Святцо и Береже для очистки и аэрации воды. Для этого предлагается реконструировать мост через протоку путем строительства нерегулируемой переливной плотины, тем самым создав перепад уровней воды в озерах около 0,10–0,15 м. Выше по течению (со стороны озера Святцо) следует разместить биоплато с тростником для поглощения растворенных веществ из воды.

Кроме того, отдельно следует обратить внимание на подверженные процессам эвтрофирования экосистемы озер Войты и Плутинок. Необходимо планировать пути оздоровления этих водоемов и борьбы с застанием. Также требует принятия мер ситуация по предотвращению загрязнения озера Дривяты водами гипертрофного озера Новято.

Результаты исследования могут использоваться для управления водными экосистемами НП «Браславские озера», при оптимизации хозяйственного использования водосборов проток и озер, в образовательном процессе при подготовке специалистов-гидрометеорологов и геоэкологов.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Государственного природоохранного учреждения «Национальный парк «Браславские озера» (проект №367/65 «Изучение современного состояния проток между водоемами Браславской группы озер как связующего элемента между водными экосистемами и разработка предложений для реализации мер по улучшению естественных путей миграции ихтиофауны к местам нереста и нагула», № ГР 20212027).

Acknowledgment. The research was supported by the National Park "Braslav Lakes" (project No. 367/65 "Investigation of the current state of the channels between the reservoirs of the Braslav group of lakes as a connecting element between aquatic ecosystems, and the development of proposals for the implementation of measures to improve the natural migration routes of the ichthyofauna to spawning grounds and feeding", SR No. 20212027).

Список использованных источников

1. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/#map=12/55.7299/27.1448>. – Дата доступа: 16.07.2021.
2. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила проведения гидрологических наблюдений и работ : ТКП 17.10-08-1-2008 (02120). – Введ. 31.10.08 (взамен «Наставлений гидрометеорологическим станциям и постам»). Ч. 1. – Минск : Минприроды, 2008. – 327 с.
3. Охрана окружающей среды и природопользование. гидрометеорология. Правила проведения гидрологических наблюдений и работ : ТКП 17.10-08-2-2008 (02120). – Введ. 31.10.08 (взамен «Наставлений гидрометеорологическим станциям и постам»). Ч. 2. – Минск : Минприроды, 2008. – 173 с.
4. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Гидрологические наблюдения : ТКП 17.10-17-1-2009. Ч. 1. Правила подготовки первичных данных гидрологических наблюдений на реках и каналах. – Минск : Минприроды, 2009. – 115 с.
5. Озера Беларуси : справочник / Б. П. Власов [и др.]. – Минск : Минсктипроект, 2004. – 284 с.
6. Оценить современное состояние и разработать мероприятия по снижению уровня деградации озер национального парка «Браславские озера» : отчет о НИР (промежут.) / БГУ ; рук. Б. П. Власов. – Минск, 2018. – 190 с. – № ГР 20180485.
7. Оценить современное состояние и разработать мероприятия по снижению уровня деградации озер национального парка «Браславские озера» : отчет о НИР (промежут.) / БГУ ; рук. Б. П. Власов. – Минск, 2019. – 188 с. – № ГР 20180485.
8. Оценить современное состояние и разработать мероприятия по снижению уровня деградации озер национального парка «Браславские озера» : отчет о НИР (заключит.) / БГУ ; рук. Б. П. Власов. – Минск, 2020. – 212 с. – № ГР 20180485.
9. Изучение современного состояния проток между водоемами Браславской группы озер как связующего элемента между водными экосистемами и разработка предложений для реализации мер по улучшению естественных путей миграции ихтиофауны к местам нереста и нагула : отчет о НИР (заключит.) / БГУ ; рук. Б. П. Власов. – Минск, 2021. – 104 с. – № ГР 20212027.
10. Новик, А. А. Гидрологический режим проток между озерами НП «Браславские озера» / А. А. Новик, Н. Ю. Суховило // Национальный парк «Браславские озера» и другие особо охраняемые природные территории: состояние, проблемы, перспективы развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Браслав, 27–28 мая 2022 г. / Государственное природоохранное учреждение «Национальный парк «Браславские озера» ; редкол.: Е. В. Андрейчик (гл. ред) [и др.]. – Минск : Ковчег, 2022. – С. 42–44.
11. Суховило, Н. Ю. Гидрохимический режим проток между озерами Браславской группы / Н. Ю. Суховило // Национальный парк «Браславские озера» и другие особо охраняемые природные территории: состояние, проблемы, перспективы развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Браслав, 27–28 мая 2022 г. / Государственное природоохранное учреждение «Национальный парк «Браславские озера» ; редкол.: Е. В. Андрейчик (гл. ред) [и др.]. – Минск : Ковчег, 2022. – С. 52–54.

References

1. OpenStreetMap (2021). Available at: <https://www.openstreetmap.org/#map=12/55.7299/27.1448> (accessed 5 November 2021).
2. TCP 17.10-08-1-2008 (02120). *Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye. Gidrometeorologiya. Pravila provedeniya gidrologicheskikh nablyudeniy i rabot* [Environmental protection and nature management. Hydrometeorology. Rules for conducting hydrological observations and work]. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2008, 327 p. (in Russian)
3. TCP 17.10-08-2-2008 (02120). *Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye. Gidrometeorologiya. Pravila provedeniya gidrologicheskikh nablyudeniy i rabot* [Environmental protection and nature management. Hydrometeorology. Rules for conducting hydrological observations and work]. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2009, 173 p. (in Russian)
4. TCP 17.10-17-1-2009. *Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye. Gidrometeorologiya. Gidrologicheskiye nablyudeniya. Chast' 1. Pravila podgotovki pervichnykh dannykh gidrologicheskikh nablyudeniy na rekakh i kanalakh* [Environmental protection and nature management. Hydrometeorology. Hydrological observations : Part 1. Rules for the preparation of primary data for hydrological observations on rivers and canals]. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2008, 115 p. (in Russian)
5. Vlasov B. P. [et al.]. *Ozyora Belarusi: spravochnik* [Lakes of Belarus: handbook]. Minsk, Minskippoeekt Publ., 2004, 284 p. (in Russian)
6. *Otsenit' sovremennoye sostoyaniye i razrabotat' meropriyatiya po snizheniyu urovnya degradatsii ozer natsional'nogo parka "Braslavskiye ozera" : otchet po NIR (pomezhutochnyi)* [Assess the current state and develop measures to reduce the level of degradation of the lakes of the Braslav Lakes National Park : research report (interim)]. BSU, supervisor B. P. Vlasov. Minsk, 2018, 190 p., no. SR 20180485. (in Russian)
7. *Otsenit' sovremennoye sostoyaniye i razrabotat' meropriyatiya po snizheniyu urovnya degradatsii ozer natsional'nogo parka "Braslavskiye ozera" : otchet po NIR (pomezhutochnyi)* [Assess the current state and develop measures to reduce the level of degradation of the lakes of the Braslav Lakes National Park : research report (interim)]. BSU, supervisor B. P. Vlasov. Minsk, 2019, 188 p., no. SR 20180485. (in Russian)
8. *Otsenit' sovremennoye sostoyaniye i razrabotat' meropriyatiya po snizheniyu urovnya degradatsii ozer natsional'nogo parka "Braslavskiye ozera" : otchet po NIR (zakluchitelnyi)* [Assess the current state and develop measures to reduce the level of degradation of the lakes of the Braslav Lakes National Park : research report (final)]. BSU, supervisor B. P. Vlasov. Minsk, 2020, 212 p., no. SR 20180485. (in Russian)
9. *Izuchenie sovremennoego sostoyaniya protok mezhdu vodoyemami Braslavskoy gruppy ozer kak svyazuyushchego elementa mezhdu vodnymi ekosistemami, i razrabotka predlozheniy dlya realizatsii mer po uluchsheniyu yestestvennykh putey migrantsii ikhtiofauny k mestam neresta i nagula : otchet po NIR (zakluchitelnyi)* [The study of the current state of the channel between the water bodies of the Braslav group of lakes as a connecting element between aquatic ecosystems, and the development of proposals for the implementation of measures to improve the natural migration routes of the ichthyofauna to spawning and feeding grounds : research report (final)]. BSU, supervisor B. P. Vlasov. Minsk, 2021, 104 p., no. SR 20212027. (in Russian)
10. Novik A. A., Sukhovilo N. Yu. *Gidrologicheskiy rezhim protok mezhdu ozerami NP "Braslavskiye ozera"* [Hydrological regime of the channel between the lakes of the NP "Braslav Lakes"]. *Natsional'nyy park "Braslavskiye ozera" i drugiye osobo okhranyayemye prirodnyye territorii: sostoyaniye, problemy, perspektivy razvitiya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of the Int. sci. and pract. conf. "Braslav Lakes National Park and other specially protected natural areas: state, problems, development prospects"]. Minsk, Covcheg Publ., 2022, pp. 42–44. (in Russian)
11. Sukhovilo N. Yu. *Gidrokhimicheskiy rezhim protok mezhdu ozerami Braslavskoy gruppy* [Hydrochemical regime of the channel between the lakes of the Braslav group]. *Natsional'nyy park "Braslavskiye ozera" i drugiye osobo okhranyayemye prirodnyye territorii: sostoyaniye, problemy, perspektivy razvitiya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of the Int. sci. and pract. conf. "Braslav Lakes National Park and other specially protected natural areas: state, problems, development prospects"]. Minsk, Covcheg Publ., 2022, pp. 52–54. (in Russian)

Информация об авторах

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

Алексей Александрович Новик – кандидат географических наук, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр-т Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: novikA@bsu.by

Information about the authors

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

Aliaksei A. Novik – Ph. D. (Geography), associate professor of the department of Earth science and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: novikA@bsu.by

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ БЕЛОВЕЖСКОЙ ПУЩИ И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

О. Г. Савич-Шемет, В. И. Пашкевич, Ю. П. Анцух

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты количественной оценки естественных ресурсов пресных подземных вод Беловежской пущи, проведенной с учетом ее геоструктурного положения, гидрогеологических особенностей в пределах каждого уточненного при построении ГИС гидрографической сети водосбора.

Предложен метод определения чувствительности подземных вод к современным климатическим вариациям путем оценки изменения величины подземного стока в реки, который рассчитывается по речному гидрографу. Показано, что за годы инструментальных наблюдений (1946–2018 гг.) период современного потепления климата (1990–2018 гг.) характеризуется снижением на 13,5 % среднемноголетней величины подземного стока в реку Лесная Правая, водосбор которой охватывает южную часть заповедной территории Беловежской пущи.

Ключевые слова: естественные ресурсы подземных вод; подземный сток; гидрограф реки; климатические изменения.

Для цитирования. Савич-Шемет О. Г., Пашкевич В. И., Анцух Ю. П. Естественные ресурсы подземных вод территории Беловежской пущи и их изменение под влиянием климатических факторов // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 54–69.

NATURAL GROUNDWATER RESOURCES OF BIALOWIEZA FOREST'S TERRITORY AND THEIR CHANGE UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS

O. G. Savich-Shemet, V. I. Pashkevich, Yu. P. Antsukh

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

Abstract. The article presents the results of a quantitative assessment of the natural resources of fresh groundwater of Bialowieza Forest, carried out taking into account its geostructural position, hydrogeological features within each specified hydrographic catchment network during the construction of GIS.

A method is proposed for determining the sensitivity of groundwater to modern climatic variations by estimating the change in the value of underground flow into rivers, which is calculated from a river hydrograph. It has been shown that during the period of instrumental observations (1946–2018), the period of modern climate warming (1990–2018) is characterized by a 13.5% decrease in the average long-term value of underground flow into the Lesnaya Pravaya River, the catchment of which covers the southern part of the protected area of Bialowieza Forest.

Keywords: natural groundwater resources; underground runoff; river's hydrograph; climatic changes.

For citation. Savich-Shemet O. G., Pashkevich V. I., Antsukh Yu. P. Natural groundwater resources of Bialowieza Forest's territory and their change under the influence of climatic factors. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 54–69.

Введение. Оценка количественных изменений ресурсов подземных вод под влиянием глобального изменения климата и других факторов – одна из наиболее обсуждаемых фундаментальных проблем в области климатологии и гидрогеологии. Подземные воды зоны активного водообмена как составляющая часть гидрологического цикла суши, несомненно, также подвержены влиянию наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений.

Количественная оценка естественных ресурсов подземных вод в региональном плане позволяет получить представления об обеспеченности того или иного региона ресурсами подземных вод, установить соотношение ресурсов подземных и поверхностных вод и роль подземного стока в общем балансе, что в целом имеет важное значение при составлении схем комплексного использования и охраны водных ресурсов и гидрогеологическом обосновании водохозяйственных балансов республики, административных областей, бассейнов рек и балансово-гидродинамических систем. Это, несомненно, актуально и на заповедных территориях, где режим подземных вод имеет главенствующую роль в формировании наземных сред. Обширные болота Беловежской пущи, большую

часть года поддерживая высокую влажность воздуха, способствуют произрастанию и сохранению отдельных видов, подлежащих особой охране.

В естественной гидродинамической обстановке подземный водоносный горизонт – достаточно сбалансированная система, и его функционирование подчинено определенным закономерностям. На современном этапе отсутствие прямого локального антропогенного воздействия на водоносный горизонт уже не является однозначным гарантом его «естественности». Поскольку большая часть территории нашей страны относится к зонам избыточного и достаточного увлажнения, на первый взгляд, это снижает актуальность проблемы влияния изменений климата на подземные воды. Однако уже на современном этапе произошло изменение и перераспределение соотношения статей водного баланса на водооборотах [3], а современные климатические изменения происходят со скоростями, сравнимыми с темпами нарастания техногенных нагрузок на окружающую среду.

Естественные ресурсы пресных подземных вод представляют собой суммарный расход потока подземной воды, который обеспечен инфильтрацией атмосферных осадков и иными факторами. Естественные ресурсы подземных вод формируются за счет питания на водораздельных пространствах и разгрузки в пониженных элементах рельефа (долины рек, болотные массивы). Основными факторами формирования ресурсов являются метеорологические (осадки и испарение), геоморфологические (расчлененность рельефа, густота речной сети), геолого-гидрогеологические (мощность и состав пород зоны аэрации, инфильтрационное питание, взаимосвязь подземных и поверхностных вод, проводимость и соотношение напоров водоносных пластов). К зоне активного водообмена приурочены большие объемы пресных подземных вод, количество которых и определяет их естественные ресурсы и эксплуатационные запасы. Суммарная величина естественных ресурсов подземных вод всей зоны стока Беларуси, включая и транзитный подземный сток, составляет 30,8 км³/год (табл. 1) [10].

Таблица 1. Баланс подземного стока Беларуси [10]

Table 1. The balance of the underground flow of Belarus

Питание подземных вод	Приход		Расход		
	Сток		Отток подземных вод	Сток	
	объем, км ³ /год	доля от общего, %		объем, км ³ /год	доля от общего, %
Верхняя часть зоны активного водообмена	16,9	55	Подземный сток, дренируемый местной гидрографической сетью	14,6	48
Остальные гидродинамические зоны стока	13,9	45	Разгрузка глубоких вод в региональные дрены	0,6	2
			Испарение с поверхности грунтовых вод	1,6	5
			Водоотбор	1,5	5
			Транзитный подземный сток за пределы Беларуси	12,5	40
<i>Всего</i>	<i>30,8</i>	<i>100</i>		<i>30,8</i>	<i>100</i>

Изучением закономерностей формирования подземного стока Беларуси занимались С. С. Белецкий, А. Г. Булавко, А. М. Гречко, Д. А. Данович, В. В. Дрозд, В. Г. Жогло, Н. А. Журавель, И. С. Зекцер, А. П. Лавров и др. [1, 2, 4, 7]. По бассейну р. Западная Двина имеется ряд совместных работ И. С. Зекцера, А. П. Лаврова, О. В. Попова. Изучению роли артезианских вод в питании р. Неман посвящена статья И. С. Зекцера. Оценка естественных ресурсов юго-востока Беларуси выполнена В. Г. Жогло.

Величина инфильтрационного питания водоносных горизонтов зоны активного водообмена на территории республики составляет 10–20 % средней многолетней величины атмосферных осадков. В общем стоке рек Беларуси на долю подземных вод приходится 47 % [10].

Водоносные горизонты верхней части зоны активного водообмена получают 16,9 км³/год инфильтрующихся вод. С учетом потери грунтовых вод на испарение (1,6 км³/год) и подтока вод из нижних гидродинамических зон (0,6 км³/год) естественные ресурсы пресных подземных вод оцениваются величиной 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут) [10]. Поскольку величина подземного стока, дренируемого местной гидрографической сетью, достигает 14,6 км³/год (см. табл. 1), можно сделать вывод, что именно она составляет определяющую часть (91,8 %) в структуре естественных ресурсов пресных подземных вод на территории Беларуси. В связи с этим оценка динамики изменения величины подземного стока в реки за многолетние периоды позволяет дать объективную характеристику изменения величины естественных ресурсов пресных подземных вод в границах речных бассейнов под влиянием как естественных (климатических), так и антропогенных (осушительные мелиорации, водоотбор и др.) факторов.

Доля артезианских бассейнов в общих ресурсах подземного стока в реки следующая: Прибалтийский – 4,7 км³/год, Брестский – 1,8, Оршанский – 6,0, Припятский – 3,4 км³/год. Из основных речных бассейнов наиболее значительные естественные ресурсы установлены в водосборе р. Днепр (вместе с р. Припять) – 7,8 км³/год (21 260 тыс. м³/сут). Паевое участие стратиграфических толщ в формировании ресурсов подземных вод изменяется от менее чем 1 % (объединенный силурийско-кембрийский комплекс и воды кристаллического фундамента) до 65 % (четвертичный комплекс). Обобщенный модуль питания водоносных горизонтов изменяется от 5,0–4,5 л/(с·км²) на приподнятых участках Белорусской и Ошмянской гряд до 1,0–0,5 л/(с·км²) на низменных площадях Полесья и Поозерья. Самые высокие значения модулей свойственны четвертичным отложениям. Большая часть речного стока (34 000 млн м³, или 59 %) формируется в пределах республики (местный сток). Приток воды с территорий соседних государств составляет 41 %, или 23 900 млн м³ в год. При этом на реки бассейна Черного моря приходится 55 % суммарного годового стока, бассейна Балтийского моря – 45 %.

Природные условия формирования ресурсов пресных подземных вод зоны активного водообмена территории Беловежской пущи. В геотектоническом отношении территория пущи расположена в пределах Подлясско-Брестской впадины. Осадочная толща на территории пущи представлена отложениями верхнего протерозоя, кембрия, ордовика, силура, частично перми, триаса (в крайней западной части впадины), верхнего мела, палеоген-неогена, квартера и четвертичными отложениями.

В гидрогеологическом отношении территория пущи приурочена к Брестскому артезианскому бассейну. Суммарная мощность осадочной толщи в наиболее пониженных частях бассейна на территории Беларуси составляет 1400–1500 м. Разнообразные по составу и простианию относительно водоупорные отложения, условия их залегания и особенности гидрогеологического развития бассейна, характеризующиеся длительными и частичными континентальными перерывами, обеспечивали глубокое проникновение палео- и современных инфильтрационных вод и формирование мощной зоны активного водообмена. Движение глубоких подземных вод осуществляется от областей питания (Белорусская антеклиза, Полесская седловина, Луковско-Ратновский горст) к областям локальной разгрузки – реки Западный Буг, Муховец и др.

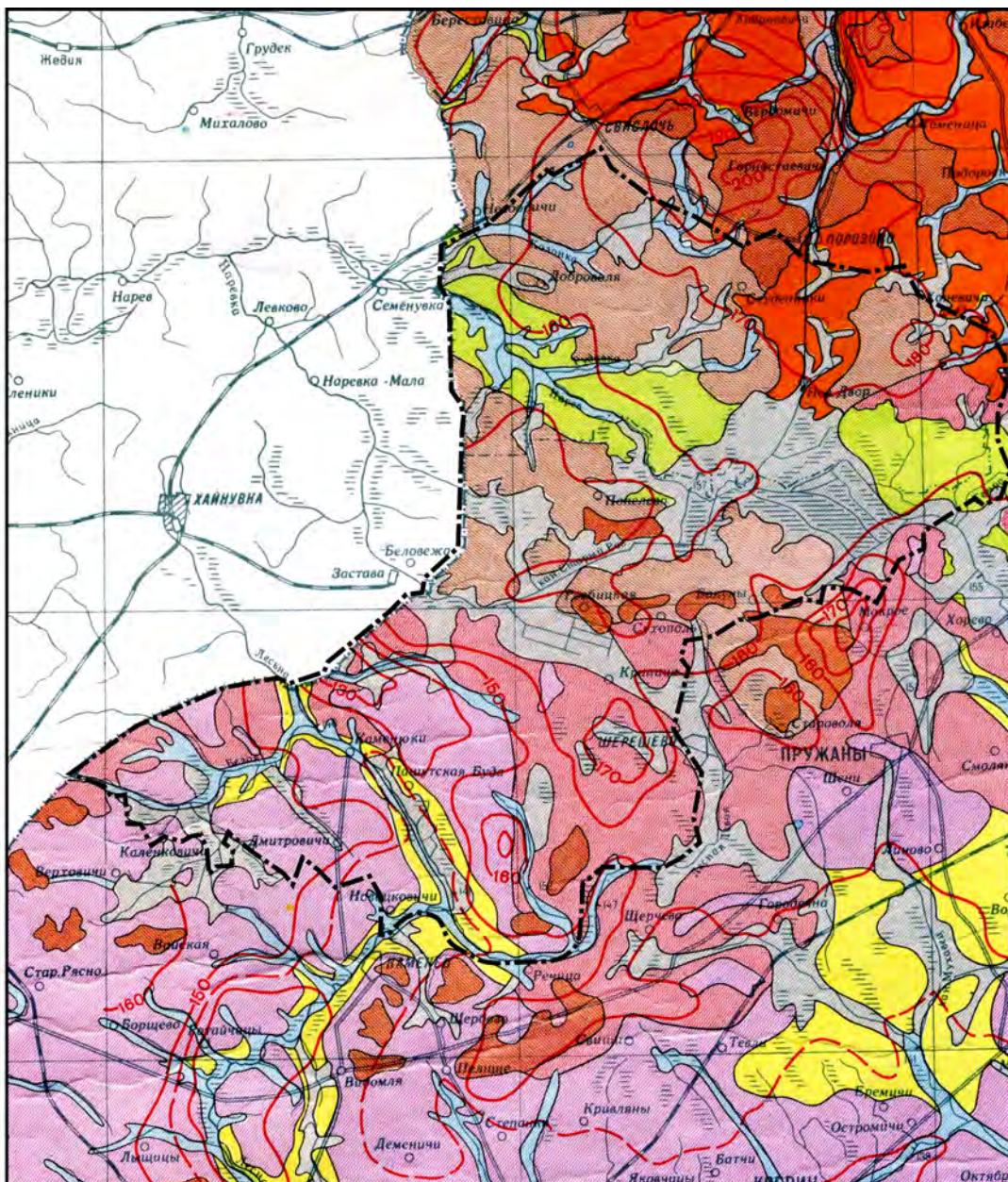
Среди отложений, образующих осадочный покров, содержатся как водонепроницаемые породы, так и мощные толщи водоносных песчаных и трещиноватых пород. Переслаивание водонепроницаемых и проницаемых слоев способствует формированию не только грунтовых (безнапорных), но и напорных водоносных горизонтов и комплексов, многие из которых характеризуются значительной водообильностью. Распространение водоносных горизонтов и комплексов в осадочной толще, степень их водообильности, характер изменения режимов определяются геологическим строением, тектоническими особенностями региона и литологическим составом пород, а также геоморфологическими, гидрогеологическими и климатическими особенностями территории.

Для территории Беловежской пущи характерно повсеместное распространение четвертичных отложений, мощным чехлом перекрывающих более древние отложения. Четвертичные отложения разнообразны по генезису, литологическому составу и мощности пород. В песчаных толщах четвертичного комплекса содержится ряд водоносных горизонтов, содержащих как безнапорные, так и напорные подземные воды.

Мощность четвертичных отложений изменяется от 54,0 до 168,0 м. Образование толщи четвертичных отложений связано с аккумулятивной деятельностью трех ледников – березинского, днепровского, сожского и водно-ледниковых потоков, образовавшихся при их таянии.

Гидрогеологические условия территории Беловежской пущи обусловлены ее геологическим строением. Пуша расположена в пределах гидрогеологической структуры второго порядка – Подлясско-Брестского артезианского бассейна. Основные водоносные горизонты и комплексы четвертичных отложений на территории пущи следующие (рис. 1):

- водоносный горизонт современных болотных образований (bIV);
- водоносный горизонт голоценовых аллювиальных отложений (aIV);
- водоносный комплекс верхнечетвертичных озерно-аллювиальных отложений (laIIIlpz);
- водоносный горизонт водно-ледниковых отложений времени отступания сожского ледника (fIIlsž^s);
- воды спорадического распространения в моренных отложениях сожского оледенения (gIIlsž);
- водоносный горизонт водно-ледниковых, аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений, залегающих между днепровской и сожской моренами (f,IglId-sž);
- слабоводоносный локально водоносный днепровский моренный комплекс (gIId);
- водоносный горизонт водно-ледниковых, аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений, залегающих между березинской и днепровской моренами (f,Iglbr-IId).



Условные обозначения:

- воды болотных и озерно-аллювиальных отложений
- воды аллювиальных отложений современных пойм рек
- воды древнеаллювиальных отложений I надпойменных террас
- воды древнеаллювиальных и озерно-аллювиальных отложений II и III надпойменных террас
- воды нерасчлененного комплекса флювиогляциальных отложений, покрыва. сожскую морену
- воды конечноморенных образований сожского оледенения
- воды внутриморенных образований сожского оледенения
- воды нерасчлененного комплекса флювиогляциальных отложений, покрыва. днепровскую морену
- воды конечноморенных образований днепровского оледенения
- воды внутриморенных образований днепровского оледенения
- гидроизогипса первого от поверхности водоносного горизонта и ее абсолютное значение
- 170-** - граница НП «Беловежская пуща»

Рис. 1. Основные водоносные горизонты и комплексы четвертичных отложений территории Беловежской пущи [11]

Fig. 1. The main water bearing horizons and complexes of quaternary sediments on the territory of Białowieża Forest [11]

По территории пущи проходит граница распространения сожской морены. Очень важной особенностью геолого-гидрогеологических условий Беловежской пущи является тот факт, что воды песчаных отложений в толще моренных супесей и суглинков сожского и днепровского ледников распространены по территории пущи повсеместно, практически образуя единый водоносный горизонт. Водовмещающими породами чаще являются пески различного гранулометрического состава (преимущественно разнозернистые) с включениями гравия и гальки изверженных пород, реже – гравийные грунты, которые переслаиваются с супесями и суглинками. В зависимости от гипсометрической поверхности современного рельефа уровень воды в них залегает на глубинах от 2–3 до 30 м.

Методы и методика исследований. Цель работы – оценить величину подземного стока в реки территории Беловежской пущи как основного компонента ресурсов пресных подземных вод зоны активного водообмена и выявить их изменения за период инструментальных наблюдений.

Исследования кроме структурно-пространственного анализа материалов, характеризующих природные условия (климатические, геоморфологические, гидрологические, геолого-гидрогеологические и др.) территории Беловежской пущи, включали анализ временных рядов наблюдений за подземным стоком в реки методом расчленения гидрографа.

Всего по территории пущи протекает 40 малых рек. Их общая длина составляет более 700 км. Реки Нарев, Наревка (левый приток р. Нарев), Лесная Правая (правый приток р. Лесная) являются трансграничными.

Реки Беловежской пущи характеризуются наличием постоянной или временной (на подъеме половодья) гидравлической связи речных и подземных вод. В период половодья в результате подпора рекой грунтовых вод подземное питание уменьшается и достигает минимума при наивысшем уровне воды в реке (рис. 2: 3, 4). При длительном стоянии высоких уровней, что более свойственно крупным рекам, происходит фильтрация речных вод в берега («отрицательное подземное питание»; см. рис. 2: 5), а на спаде половодья или в начале межени эти воды возвращаются в реку (береговое регулирование речного стока).

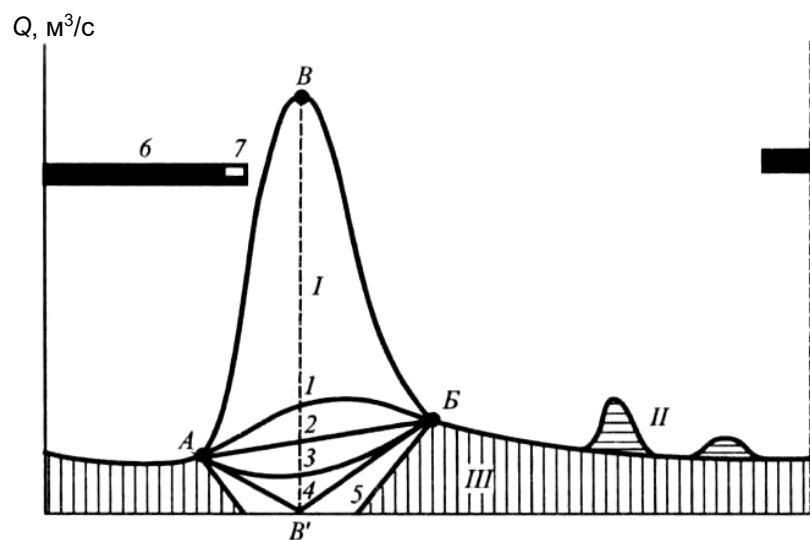


Рис. 2. Схема расчленения гидрографа реки по видам питания [2, 6]: I, II и III – снеговое, дождевое и подземное питание соответственно; A, Б и В – начало, конец и пик половодья соответственно; 1–5 – линии, разделяющие снеговое и подземное питание в период половодья при различном характере взаимодействия речных и грунтовых вод (пояснения см. в тексте); 6 – ледостав; 7 – ледоход

Fig. 2. The scheme of river hydrograph split according to nutrition type [2, 6]: I, II and III – snow, rain and underground nutrition respectively; A, Б and В – a beginning, an end and a peak of a flow respectively; 1–5 – lines divided snow and underground nutrition during a flow period when different character of river and groundwater correlation (the explanation is in the text); 6 – freeze-up; 7 – ice drift

Согласно предложенной В. В. Дроздом, Б. В. Поляковым, Б. И. Куделиным, К. В. Воскресенским, О. В. Поповым схеме расчленения гидрографа в момент пика половодья условно принята величина подземного питания, равная нулю (см. рис. 2: 4) [2].

По совокупности геологических, гидрогеологических и физико-географических условий Беларусь выделены гидрогеологические районы, отличающиеся условиями формирования подземного стока в реки (рис. 3) [5, 12].

Условия западного подрайона (IV) (см. рис. 3) отличаются тем, что здесь реки Западный Буг, Мухавец, Лесная дренируют четвертичные (аллювиальные и флювиогляциальные) водоносные отложения общей мощностью 50–100 м и менее 50 м на юге, неоген-палеогеновый водоносный комплекс, а также гидравлически связанные с реками водоносные горизонты верхнемеловых и частично верхнеюрских отложений. От Полесской седловины верхнемеловые отложения, а далее на западе верхнеюрские отложения погружаются в сторону Брестской впадины. Дочетвертичная поверхность, так же, как и в смежном подрайоне, отличается спокойным рельефом. Максимальные отметки пьезометрической поверхности подземных вод достигают более 160 м на севере и снижаются до 140–130 м в центре и на западе в долине рек Мухавец и Буг.

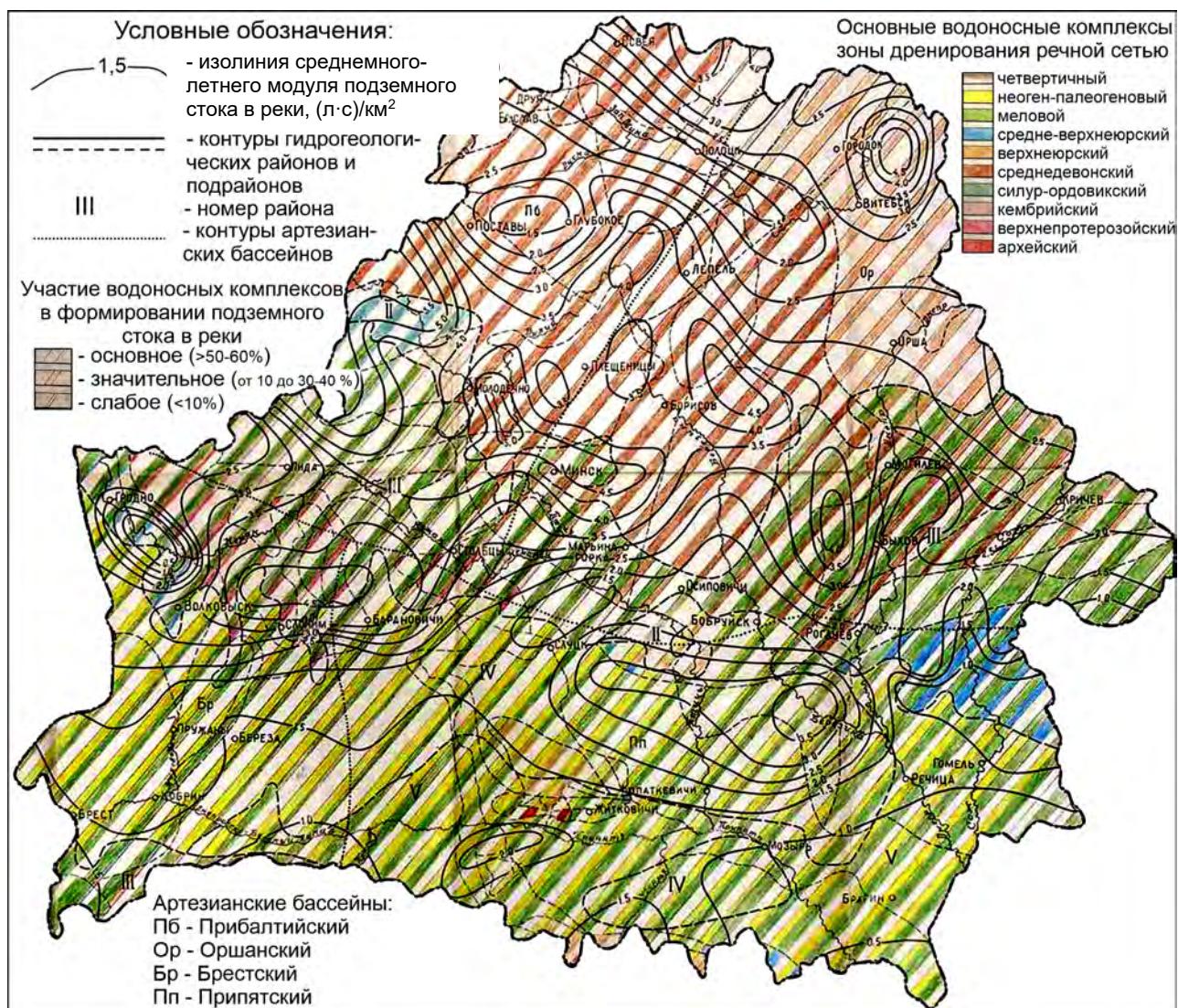


Рис. 3. Схема гидрогеологических районов территории Беларуси по условиям формирования подземного стока в реки [5]

Fig. 3. The scheme of the hydrogeological regions of the territory of Belarus according to the conditions of the formation of an underground flow into rivers [5]

Зона активного водообмена – верхняя часть подземной гидросферы, которая находится под дренирующим воздействием тех или иных источников разгрузки подземных вод. Подразделяется на подзону интенсивного водообмена, в которой формируется подземный сток в реки, и подзону «значительного» (по М. А. Гатальскому) водообмена, где циркулируют также преимущественно пресные воды, но разгрузка их происходит на уровне базисов дренирования погруженных тектонических впадин и морских бассейнов [4, 7].

Естественные ресурсы подземных вод зоны активного водообмена – это обеспеченный питанием расход подземных вод, участвующий в формировании речного стока и восполнении более глубоких водоносных комплексов. Количественно они выражаются суммарной величиной подземного стока в реки (озера, болота и т. д.) и дополнительного к нему артезианского или транзитного подземного стока, не перехватываемого речной сетью на данной территории. Таким образом, расчет подземного стока по речному гидрографу характеризует ту часть естественных ресурсов, которая перехватывается местной и отчасти региональной речной сетью. Действительная величина ресурсов подземных вод зоны активного водообмена дополняется еще глубоким подземным стоком, а также потерями речного стока на испарение и ледообразование и расходованием подземных вод на питание болотных систем.

Количественная оценка величины подземного стока в реки в границах Беловежской пущи выполнена по материалам ранее проведенных исследований для территории Беларуси [1, 2, 4–8, 10, 11]. В основу оценки изменений величины подземного стока в реки и влияния на нее климатических факторов положены данные инструментальных наблюдений:

- за расходом рек территории Беловежской пущи: р. Лесная Правая (гидрологический пост Каменец) – период инструментальных наблюдений за количественными характеристиками реки составляет 72 года (1946–2018 гг.); реки Нарев (гидрологический пост Немержа) – период инструментальных наблюдений за количественными характеристиками реки составляет 43 года (1972–2015 гг.). На основании этих данных методом расчленения гидрографа определялся подземный сток в реки;
- за количеством атмосферных осадков и температурой атмосферного воздуха по данным близлежащих метеорологических станций – Волковыск и Пружаны. Период инструментальных наблюдений составляет 75 лет (1945–2020 гг.).

Результаты и их обсуждение. Беловежская пуша расположена в Брестской и Гродненской областях Беларуси. Основными водоносными комплексами, участвующими в формировании подземного стока в реки, являются комплексы, приуроченные к толще четвертичных отложений, палеоген-неогеновый и меловой. Распределение величины подземного стока в реки по водосборам рек в границах территории Беловежской пущи с учетом данных [5] представлено в табл. 2. Значение модуля подземного стока в реки изменяется от 1,78 л/(с·км²) (р. Сипурка) до 2,67 л/(с·км²) (р. Ятвэзь).

На рис. 4 показано соотношение величины подземного стока в реки по территории Беловежской пущи. Суммарная величина подземного стока составляет 302 206,56 м³/сут, максимальными значениями подземного стока характеризуются водосборы рек Нарев и Лесная Правая.

Инфильтрационное питание подземных вод за счет атмосферных осадков в среднемноголетнем разрезе определяет их естественные ресурсы. Беловежская пуша, как и вся территория республики, расположена в зоне достаточного увлажнения. В среднем за год на территории пущи выпадает от 592 мм (метеостанция Пружаны) до 623 мм (метеостанция Волковыск) жидкых атмосферных осадков. Наибольшее их количество выпадает на возвышенностях, которые лежат на пути преобладающего западного переноса воздушных масс, характерного для всей территории страны. Отмечена генеральная особенность пространственно-временного изменения осадков территории республики в последние 15–20 лет, состоящая в росте осадков на большей части территории страны, за исключением Брестской области [8], что отражается также и на Беловежской пуще. Как видно из табл. 3, в изменении значений количества осадков за теплый (апрель – октябрь) и холодный периоды года отмечена тенденция к снижению на станции Пружаны (юг Беловежской пущи) на величину порядка 30 мм за апрель – октябрь и 14 мм для холодного периода.

Изменчивость осадков за годовой и внутригодовой периоды характеризуется коэффициентами вариации (C_v). Как показывают результаты расчетов C_v , годовая сумма осадков слабо колеблется от года к году и составляет 0,18 для Волковыска и 0,175 для Пружан. При этом эти значения можно отнести к области пониженных значений коэффициентов вариации, что больше характерно для северных районов республики. Гораздо большие коэффициенты вариации наблюдаются в отдельные сезоны года (табл. 4). Для октября месяца эти значения максимальны ($C_v = 0,72–0,79$) и также представляют собой максимум по республике.

Пространственно-временное распределение атмосферных осадков зависит от направления движения циклонов, положения фронта раздела, происхождения и мощности влажных воздушных масс, рельефа местности, экспозиции склонов и ряда других факторов.

В пространственной коррелированности месячных сумм атмосферных осадков четко выражен годовой пик связаннысти полей осадков в октябре месяце ($r_{окт} = 0,94$), который существенно выше, чем в теплый период ($r_{июнь} = 0,59$), что отмечается также для всей Беларуси в целом, в том числе и для Черноморского и Балтийского склонов. В теплый период увеличивается роль локальной неоднородности осадков за счет конвективных процессов в атмосфере. Такая минимальная пространственная корреляция осадков, наблюдавшаяся в летние месяцы на территории пущи в июне, может быть объяснена несколько большей масштабностью конвективных процессов в это время.

Таблица 2. Подземный сток в реки в границах территории Беловежской пущи**Table 2. An underground flow into rivers in the borders of the territory of Bialowieza Forest**

№ п/п	Река	Площадь водосбора, км ²	Подземный сток в реки в пределах водосбора	
			Модуль, л/с·км ²	Величина, м ³ /сут
1	Лесная Левая	96,122	1,97	16 360,73
2	Вишня	36,113	1,92	5990,71
3	Плюсковка	96,789	2,03	16 976,02
4	Белая	82,049	1,87	13 256,49
5	Калиновец	7,186	1,99	1235,53
6	Станок	18,557	1,97	3158,55
7	Сипурка	2,855	1,78	439,08
8	Лесная Правая	138,069	1,95	23 261,87
9	Гитка	13,326	2,02	2325,76
10	Поперечная	0,200	2,07	35,77
11	Зубрица	14,614	1,95	2462,17
12	Соломенка	84,817	2,10	15 389,20
13	Переволока	26,799	2,05	4746,64
14	Полична	38,154	1,88	6197,43
15	Яменка	5,970	2,11	1088,35
16	Нарев	281,137	2,34	56 839,15
17	Еленка	4,866	2,23	937,54
18	Орлувка	0,643	2,28	126,67
19	Ольховка	16,606	2,26	3242,55
20	Гвозна	49,395	2,33	9943,81
21	Тушемлянка	26,705	2,41	5560,62
22	Немержанка	34,838	2,41	7254,11
23	Ясельда	84,700	2,13	15 587,51
24	Зельвянка	11,574	2,45	2449,98
25	Щиба	20,979	2,29	4150,82
26	Хоровка	10,270	2,19	1943,25
27	Медянка	39,378	2,35	7995,31
28	Пчелка	37,391	2,59	8367,21
29	Кулевка	9,935	2,53	2171,71
30	Рудавка	48,639	2,45	10 295,90
31	Дрюновка	34,175	2,41	7116,06
32	Побойка	12,272	2,55	2703,77
33	Ломовка	10,157	2,55	2237,79
34	Наревка	104,574	2,47	22 316,93
35	Песец	9,013	2,58	2009,11
36	Колонна	47,420	2,60	10 652,43
37	Крапивница	14,540	2,67	3354,20
38	Березовка	0,125	2,60	28,08
39	Ятвэзь	8,660	2,67	1997,76
40	Россь	30,586	2,58	6817,99
<i>Итого</i>		1610,2	—	302 206,56

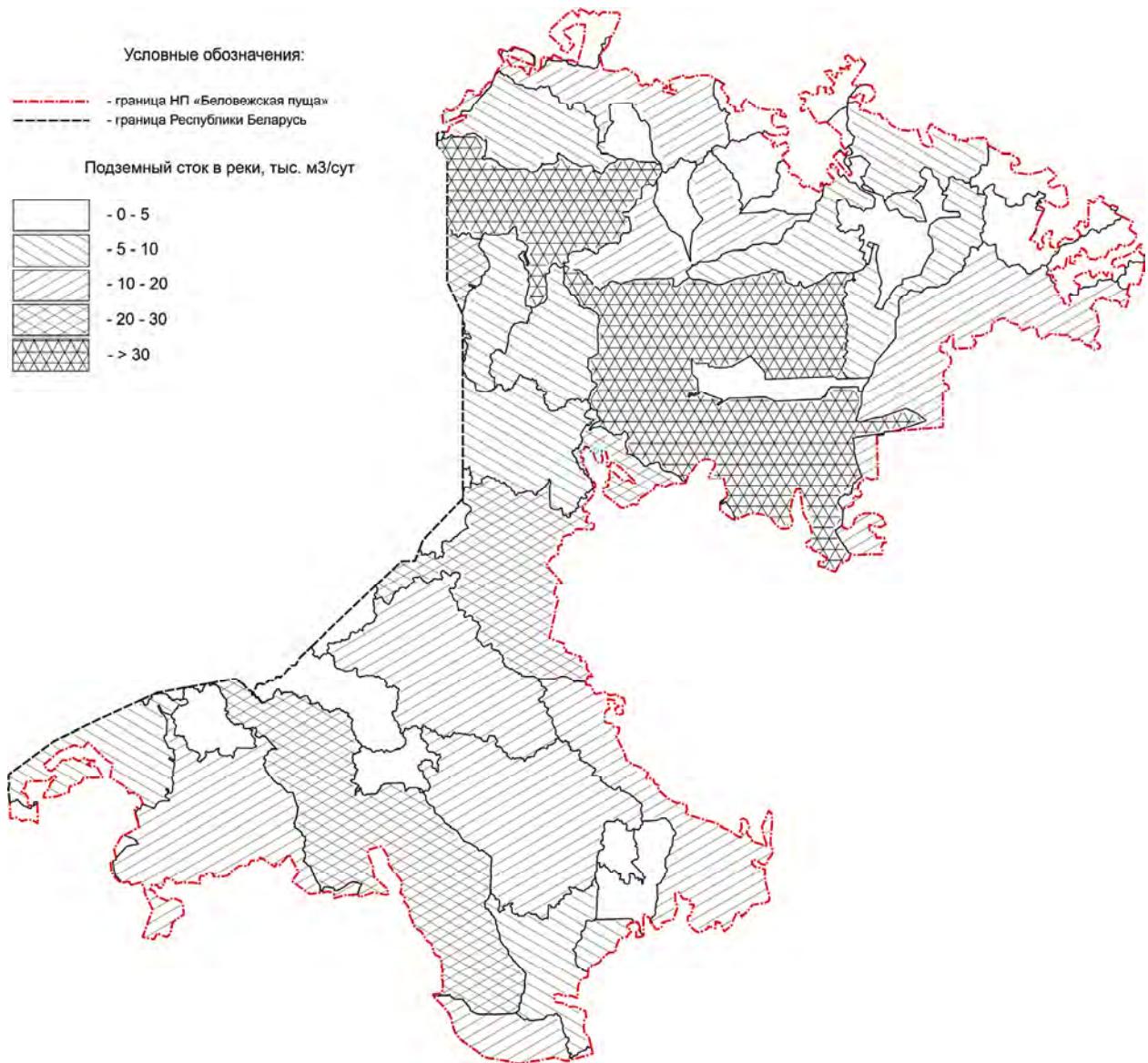


Рис. 4. Карта-схема распределения подземного стока в реки по территории Беловежской пущи

Fig. 4. A map-scheme of the distribution of an underground flow into rivers on the territory of Bialowieza Forest

Таблица 3. Изменение средних значений количества атмосферных осадков за теплый (апрель – октябрь) и холодный периоды года по метеорологическим станциям Волковыск и Пружаны, 1977–2021 гг.

Table 3. Changes of the average values of precipitations number during warm (April – October) and cold year periods according to Vawkavysk and Pruzhany meteorological stations, 1977–2021

Станция	Период, гг.			Станция	Период, гг.		
	1977–1988	1989–2000	2001–2022		1977–1988	1989–2000	2001–2022
Теплый период							
Волковыск	428,7	428,2	426,8	Пружаны	435,7	420,0	406,9
Холодный период							
Волковыск	208,0	211,2	200,0	Пружаны	192,4	172,4	177,8

Таблица 4. Внутригодовые коэффициенты вариации (C_v) за период инструментальных наблюдений, 1945–2021 гг.

Table 4. Intra-annual coefficients of variation (C_v) for the period of instrumental observations, 1945–2021

Метеостанция	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нояб	Дек	Год
Волковыск	0,49	0,46	0,50	0,52	0,45	0,45	0,56	0,62	0,62	0,72	0,43	0,50	0,18
Пружаны	0,54	0,44	0,49	0,49	0,48	0,52	0,53	0,57	0,62	0,79	0,44	0,45	0,17

В целом можно сделать вывод, что статистически значимых различий осадков в разные месяцы года, среднегодовых осадков и осадков в теплое и холодное время года во все временные периоды не отмечалось, что говорит о стабильности режима увлажнения территории пущи с уклоном в генеральную особенность изменения осадков на территории республики – это снижение их количества во второй половине по сравнению с первой половиной XX в.

В то же время один из основных параметров в условиях умеренного континентального климата пущи – температура воздуха – претерпела существенные изменения. Средняя годовая температура воздуха метеостанции Волковыск составляет от 5,0 до 9,6 °C, а метеостанции Пружаны – от 5,1 до 9,6 °C средняя месячная температура самого теплого месяца (июля) на метеостанции Пружаны – от 14,3 до 22,6 °C, на метеостанции Волковыск – от 14,2 до 22,1 °C, самого холодного месяца (января) на метеостанции Пружаны – от -15,4 до 1,7 °C, на метеостанции Волковыск – от -15,2 до 1,8 °C.

Результаты определения величины дисперсии временного ряда, выбираемой динамической нормой за период инструментальных наблюдений (1945–2021 гг.) за температурой атмосферного воздуха на метеостанциях Волковыск и Пружаны показали формирование устойчивого положительного тренда в изменении среднегодовой температуры воздуха мощностью более 30,0 % от общей дисперсии ряда (σ^2) (рис. 5).

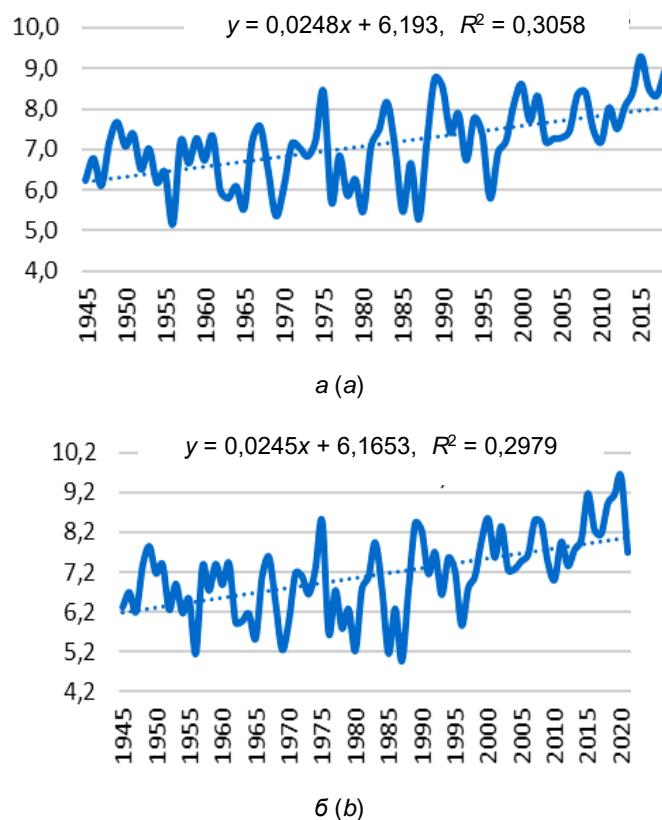


Рис. 5. Средняя многолетняя температура атмосферного воздуха за период 1945–2021 гг., °C:
а – метеостанция Пружаны; б – метеостанция Волковыск

Fig. 5. Average perennial temperature of atmospheric air for the period of 1945–2021, °C:
a – Pruzhany meteorological station; b – Vawkavysk meteorological station

Рост температуры на территории пущи, как и в целом по территории республики, выявил ряд особенностей. В табл. 5 представлены внутригодовые изменения средних значений температуры для различных периодов.

Таблица 5. Разность температуры для различных периодов времени

Table 5. Difference in temperature for different time periods

Период	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нояб	Дек	Год
Волковыск													
1977–2000 гг.	-3,8	-3,5	0,7	7,0	13,0	16,0	17,2	16,9	12,0	7,3	1,4	-2,5	6,9
2001–2021 гг.	-3,5	-2,6	1,9	8,2	13,7	17,2	19,5	18,5	13,5	7,8	3,3	-1,2	8,0
Разность двух периодов	0,3	0,9	1,1	1,1	0,7	1,2	2,3	1,6	1,4	0,5	1,9	1,3	1,2
Средний рост температуры за первую и вторую часть года	0,9						1,5						
Пружаны													
1977–2000 гг.	-3,7	-3,3	1,0	7,3	13,3	16,3	17,4	17,1	12,2	7,4	1,6	-2,2	7,1
2001–2021 гг.	-3,5	-2,6	1,9	8,3	13,7	17,4	19,7	18,6	13,4	7,8	3,4	-1,2	8,1
Разность двух периодов	0,3	0,7	1,0	1,0	0,5	1,1	2,3	1,6	1,2	0,4	1,8	1,1	1,1
Средний рост температуры за первую и вторую часть года	0,7						1,4						

Как видно из табл. 5, потепление в годовом ходе сместилось на вторую половину года. Подобное развитие событий наблюдалось и в предыдущее потепление (1920-е – начало 1940-х годов), в том числе не только на территории республики. Это потепление известно из литературы как потепление Арктики. Оно особенно ярко проявилось в изменении температуры северного полушария в июле и ноябре.

Следует отметить, что описанный выше характер развития атмосферных процессов отмечается на территории большей части Европы. Гипотезы, объясняющие быстрый рост температуры в Арктике в последние десятилетия, выдвигаются учеными всего мира [8, 9].

Изменения климата неизбежны, что подтверждается не только современными исследованиями, но и ретроспективным анализом истории формирования Земли. Принятие той или иной климатической доктрины приводит к различным диагнозам прошедших и прогнозам будущих состояний всех компонентов окружающей среды, в том числе ресурсов подземных вод.

Не располагая достаточно достоверными данными о потерях подземных вод на испарение, ледообразование и т. д., а также материалами для оценки подруслового стока, в данной работе ограничимся выделением основной составляющей ресурсов подземных вод, а именно подземного стока в реки, рассчитанного по гидролого-гидрогеологическому методу.

Оценочные значения подземного стока по речному гидрографу характеризуют ту часть естественных ресурсов, которая перехватывается местной и отчасти региональной речной сетью. Оценка изменений ресурсов подземных вод зоны активного водообмена территории пущи за период инструментальных наблюдений выполнена по интегральному показателю – подземному стоку в реки.

Изменения подземного стока в реки оценены для:

- периода, предшествующего этапу современного потепления климата (до 1989 г.);
- периода современного потепления климата Беларуси (с 1990 г.).

Среднемноголетние гидрографы рек Лесная Правая и Нарев для двух указанных периодов с выделением в их структуре доли подземного стока в реки представлены на рис. 6.

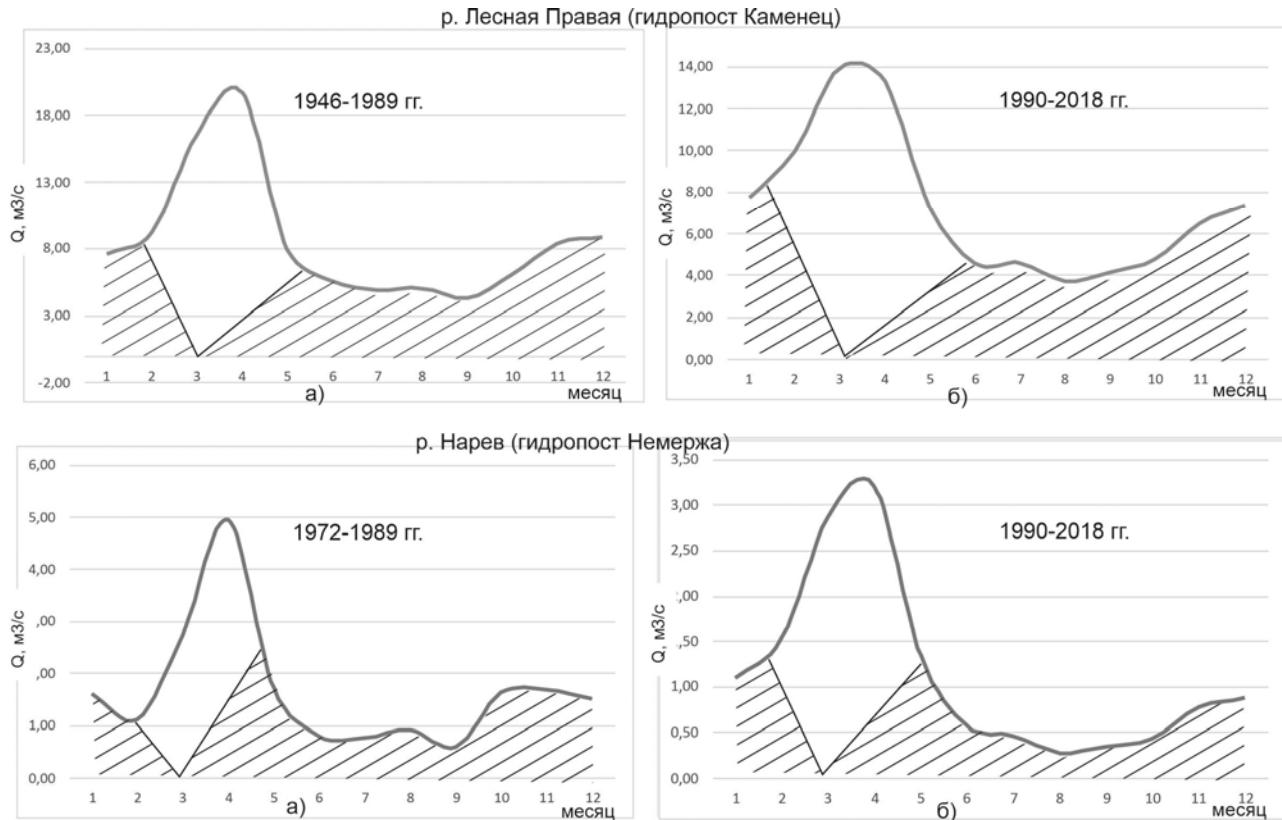


Рис. 6. Схема расчленения среднемноголетних гидрографов с выделением величины подземного стока в реки Лесная Правая (г/п Каменец), Нарев (г/п Немержа) для двух периодов: а) – до 1989 г.; б) – с 1990 г.

Fig. 6. The scheme of the split of the average perennial hydrographs with the highlight magnitude of under-ground flow into the Lesnaya Pravaya river (Kamyenyets hydrological fasting), the Narev (Nemerza hydrological fasting) for two periods: а) – to 1989; б) – from 1990

Водосбор р. Лесная Правая в створе гидропоста Каменец (его площадь составляет 1840 км^2) включает районы южной части Беловежской пущи, а водосбор р. Нарев в створе гидропоста Немержа (его площадь составляет 326 км^2) включает районы ее северной части.

Анализ результатов оценки подземного стока рек Лесная Правая и Нарев свидетельствует о его существенном снижении в период современного потепления климата (период после 1990 г.). Так, если в период 1946–1989 гг. среднемноголетний подземный сток в р. Лесная Правая (гидропост Каменец) составлял $5,26 \text{ м}^3/\text{s}$, то в период 1990–2018 гг. он снизился до $4,62 \text{ м}^3/\text{s}$. Аналогичные изменения выявлены и в бассейне р. Нарев. В период 1972–1989 гг. среднемноголетний подземный сток в р. Нарев (гидропост Немержа) составлял $1,37 \text{ м}^3/\text{s}$, а в период 1990–2015 гг. он снизился до $0,81 \text{ м}^3/\text{s}$.

Таким образом, период современного потепления климата характеризуется весьма значительным изменением величины подземного стока в реки, а следовательно, и величины естественных ресурсов подземных вод на данной территории. Так, если на сравнительно большом по площади водосборе р. Лесная Правая в створе гидропоста Каменец его снижение составило 13,5 %, то на небольшом водосборе р. Нарев в створе поста Немержа это снижение достигло 40,9 %. Это различие обусловлено, по-видимому, в первую очередь различной длиной рядов наблюдений для периода, предшествующего потеплению. На р. Нарев (пост Немержа) этот ряд составляет всего 17 лет и включает годы очень высокой водности (1974, 1980, 1988 г.). Гораздо более представительным является подобный ряд наблюдений на р. Лесная Правая (пост Каменец). Здесь он составляет 43 года и включает периоды как с высокой, так и с низкой водностью.

Научный интерес представляет исследование изменений подземного питания рек во взаимосвязи с фазами атлантического мультидекадного колебания. Атлантическая мультидекадная осцилляция (AMO) – это квазипериодические изменения температуры поверхности океана в Северной Атлантике с характерным временным масштабом от 50 до 100 лет, представляющие собой одно из проявлений естественной изменчивости в системе океан – атмосфера (рис. 7). В периоде наблюдений на реках Лесная Правая и Нарев выделены следующие периоды (фазы) в соответствии с изменениями AMO:

- 1926–1965 гг. – период положительных значений индекса АМО;
- 1966–1976 гг. – период отрицательных значений индекса АМО;
- 1977–2000 гг. – период отрицательных значений индекса АМО возрастающей ветви;
- 2001–2019 гг. – период положительных значений индекса АМО.

Многолетний ход изменений подземного стока в р. Лесная Правая в створе гидропоста Каменец по выделенным периодам представлен на рис. 8, р. Нарев в створе гидропоста Немержа – на рис. 9.

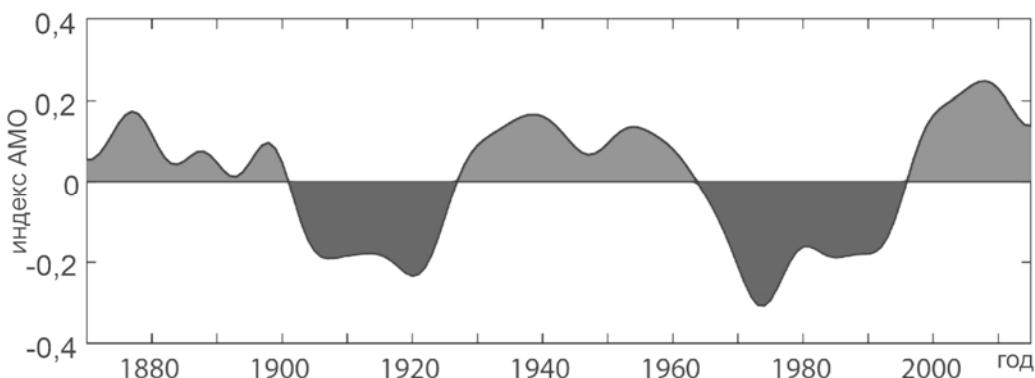
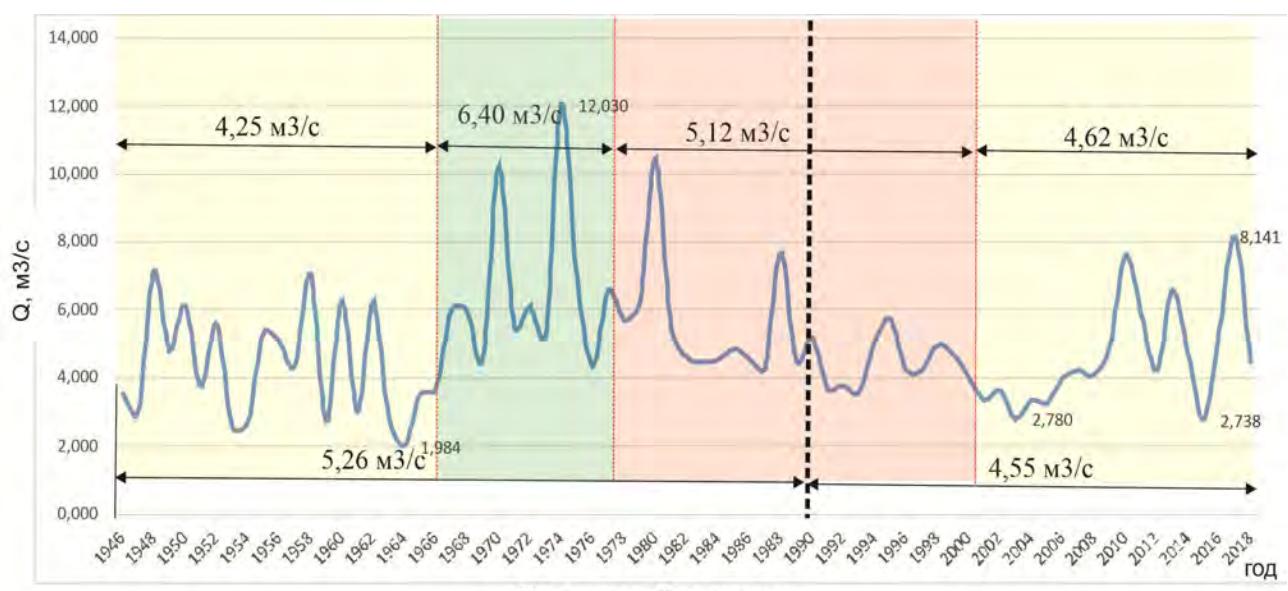


Рис. 7. Изменчивость АМО, 1870–2015 гг.

Fig. 7. AMO changeability, 1870–2015



Условные обозначения:

- 1966–1976 гг. – период отрицательных значений индекса АМО
- 1977–2000 гг. – период отрицательных значений индекса АМО возрастающей ветви,
- 1946–1965 гг., 2001–2018 гг. – период положительных значений индекса АМО
- начало периода современного потепления климата (1990 г.)

Рис. 8. Динамика изменения подземного стока в р. Лесная Правая (гидрологический пост Каменец), 1946–2018 гг.

Fig. 8. The dynamics of the change of an underground flow into the Lesnaya Pravaya river (Kamyenyets hydrological fasting), 1946–2018

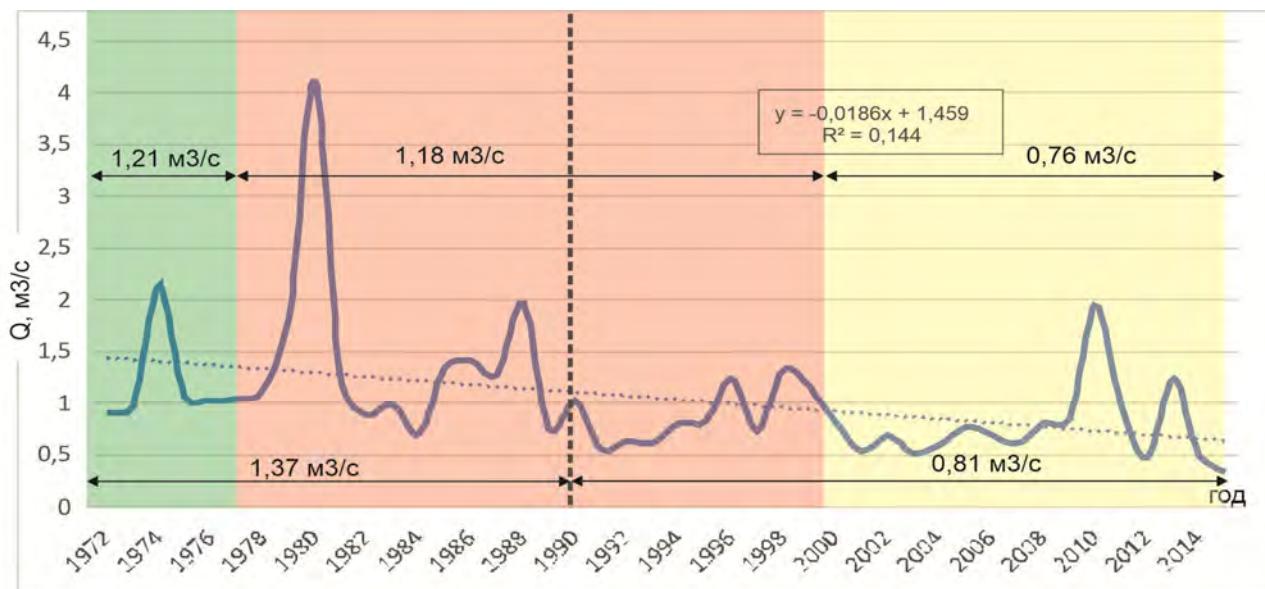


Рис. 9. Динамика изменения подземного стока р. Нарев (гидрологический пост Немержа), 1972–2015 гг. Условные обозначения те же, что и на рис. 8

Fig. 9. The dynamics of the change of an underground flow into the Narev river (Nemerzha hydrological fasting), 1972–2015. Conventional designations are the same as in fig. 8

Как видно из рис. 8 и 9, период современного потепления климата (1990–2018 гг.) характеризуется снижением среднемноголетнего значения подземного стока на величину 13,5 %.

На основе фактических гидрологических данных можно сделать вывод об изменении ресурсов подземных вод за период инструментальных наблюдений в сторону сокращения, и эта величина составляет 13,5 %. С учетом двух выявленных особенностей изменений атмосферных осадков и температуры воздуха, а именно стабильности режима увлажнения территории пущи с уклоном в снижение по данным метеостанции Пружаны и формирования устойчивого положительного тренда в изменении среднегодовой температуры воздуха мощностью более 30,0 % от общей дисперсии ряда (σ^2) со смещением потепления на вторую половину года, можно говорить, что подземные воды не получают дополнительного питания, а следовательно, происходит снижение емкостных гравитационных и упругих запасов подземных вод рек Лесная Правая и Нарев.

Также необходимо отметить наличие различий по fazам AMO, где максимальным значением подземного стока р. Лесная Правая ($6,40 \text{ м}^3/\text{с}$) и р. Нарев ($1,21 \text{ м}^3/\text{с}$) характеризуется вторая выделенная фаза – период отрицательных значений индекса AMO нисходящей ветви ряда наблюдений (1966–1976 гг.). Период отрицательных значений индекса AMO возрастающей ветви (1977–2000 гг.) характеризуется уже сниженными значениями подземного стока р. Лесная Правая ($5,12 \text{ м}^3/\text{с}$) и р. Нарев ($1,18 \text{ м}^3/\text{с}$), т. е. отмечается снижение на 20 и 3 % соответственно. Период положительных значений индекса AMO (2001–2018 гг.) характеризуется минимальными значениями подземного стока р. Лесная Правая ($4,62 \text{ м}^3/\text{с}$) и р. Нарев ($0,76 \text{ м}^3/\text{с}$), т. е. отмечается снижение на 27,8 и 37,2 % соответственно относительно фазы максимальных значений подземного стока.

Авторами выявлено, что глобальные изменения климата, локальные особенности изменения климата Беларуси, а также изменчивость в системе океан – атмосфера нашли свое отражение в тенденциях изменений подземного стока в реки Беловежской пущи. Так, период современного потепления климата (с 1990 г.) характеризуется снижением подземного стока в реки Лесная Правая (13,5 %) и Нарев (41,2 %), периоды положительных значений индекса AMO (1946–1965 гг., 2001–2018 гг.) характеризуются минимальными значениями подземного стока в реки.

Заключение. На основе фактических метеорологических, гидрологических данных, характеризующих изменения температуры воздуха, количества осадков, водного и термического режима на территории Беловежской пущи, проведена оценка изменений величин подземного стока в реки как основной части ресурсов подземных вод зоны активного водообмена.

Анализируемый период инструментальных наблюдений за стоком рек Беловежской пущи (1946–2018 гг.) разбит в соответствии с подпериодами глобальных изменений климата, локальных особенностей изменения климата Беларуси, а также изменчивости в системе океан – атмосфера. Период современного потепления климата (1990–2018 гг.) характеризуется снижением среднемноголетнего значения подземного стока на величины 13,5 % (р. Лесная Правая) и 41,2 % (р. Нарев).

Период положительных значений индекса АМО (2001–2018 гг.) характеризуется минимальными значениями подземного стока р. Лесная Правая ($4,62 \text{ м}^3/\text{с}$) и р. Нарев ($0,76 \text{ м}^3/\text{с}$), т. е. отмечается снижение на 27,8 и 37,2 % соответственно относительно фазы максимальных значений подземного стока. Иными словами, анализ результатов оценки подземного стока рек Лесная Правая и Нарев свидетельствует о его существенном снижении в период современного потепления климата (период после 1990 г.), а параллельно периоды положительных значений индекса АМО (1946–1965 гг., 2001–2018 гг.) характеризуются минимальными значениями подземного стока в реки.

Несмотря на имеющиеся объективные и субъективные неопределенные использованного в работе метода, исследования чувствительности подземных вод к современным климатическим вариациям необходимы в том числе на особо охраняемых природных территориях для разработки стратегий и планов реагирования на возможные изменения окружающей среды.

Список использованных источников

1. Белецкий, С. С. Опыт оценки подземного стока в реки БССР / С. С. Белецкий // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии : сб. науч. тр. / Белорус. науч.-исслед. геологоразведоч. ин-т ; науч. ред. А. П. Лавров. – Минск, 1974. – С. 60–75.
2. Белецкий, С. С. Формирование естественных ресурсов подземных вод зоны активного водообмена на территории БССР : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук : 04.00.06 / С. С. Белецкий. – Минск, 1975. – 25 с.
3. Дзюба, А. В. Неопределенности оценки влияния современных вариаций климата на подземные воды / А. В. Дзюба, И. С. Зекцер // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2016. – Т. 466, № 1. – С. 88–91.
4. Дрозд, В. В. Водные ресурсы Беларуси: методология, структура, оценка, прогноз / В. В. Дрозд. – Минск : Ковчег, 2010. – 202 с.
5. Изменение ресурсов подземных вод на примере отдельных районов Белоруссии в связи с мелиорацией, гидротехническим строительством и сосредоточенным водоотбором / БелНИГРИ ; рук. С. С. Белецкий. – Минск, 1977. – Т. III, графические приложения, прилож. № 9.
6. Козлов, М. Ф. Закономерности естественного режима подземных вод Припятского Полесья / М. Ф. Козлов // Режим, баланс подземных вод. – Минск : Наука и техника, 1967. – С. 93–155.
7. Лавров, А. П. Формирование подземного стока в зоне избыточного увлажнения (Белоруссия) / А. П. Лавров // Режим, баланс подземных вод. – Минск : Наука и техника, 1967. – С. 157–213.
8. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 314 с.
9. 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.
10. Полезные ископаемые Беларусь: к 75-летию БелНИГРИ / Редкол. : П. З. Хомич [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.
11. Режим и баланс подземных вод территории Беловежской пущи : технический отчет (заключ.) / Белорусская геолого-гидрогеологическая экспедиция. Центральная гидрогеологическая партия ; рук. Н. Ф. Авхимович. – Минск, 1975. – 261 с.
12. Шестопалов, В. М. Методы изучения естественных ресурсов подземных вод / В. М. Шестопалов. – М. : Недра, 1988. – 168 с.

References

1. Beleckij S. S. *Opty ocenki podzemnogo stoka v reki BSSR* [Estimation experience of an underground flow into the rivers of BSSR]. *Voprosy gidrogeologii i inzhenernoj geologii* : sb. nauch. tr. Belorus. nauch.-issled. Geologorazvedoch. in-ta [Proc. of the BelNIGRI "Hydrogeology and engineering geology issues"]. Ed. A. P. Lavrov. Minsk, 1974, pp. 60–75. (in Russian)
2. Beleckij S. S. *Formirovaniye estestvennyh resursov podzemnyh vod zony aktivnogo vodoobmena na territorii BSSR*. Avtoref. dis. ... kand. geol.-miner. nauk [Formation of natural groundwater resources in the zone of active water exchange on the territory of BSSR. Geology and mineralogy abstract ph. diss.]. Minsk, 1975, 25 p. (in Russian)
3. Dzyuba A. V., Zekcer I. S. *Neopredelennosti ocenki vliyanija sovremennych variacij klimata na podzemnye vody* [The uncertainties of the estimation of the influence of modern climate variations on ground waters]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 466, no. 1, pp. 88–91. (in Russian)
4. Drozd V. V. *Vodnye resursy Belarusi: metodologiya, struktura, ocenka, prognoz* [Water resources of Belarus: methodology, structure, estimation, forecast]. Minsk, 2010, 202 p. (in Russian)
5. *Izmenenie resursov podzemnyh vod na primere otdel'nyh rajonov Belorussii v svyazi s melioracij, gidrotekhnicheskim stroitel'stvom i sosredotochennym vodoootborom* [The change of ground water resources on the example of separate regions of Belarus in correlation to melioration, geotectonic building and focused water sampling]. *BelNIGRI* [Belarusian Research Geological Exploration Institute]. Head S. S. Beleckij. Minsk, 1977, vol. III, graphics applications, applications no. 9. (in Russian)

6. Kozlov M. F. *Zakonomernosti estestvennogo rezhima podzemnyh vod Pripyatskogo Poles'ya* [Consistent regularities of natural regime of ground waters of Pripyat Polesia]. *Rezhim, balans podzemnyh vod* [Regime, balance of ground waters]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1967, pp. 93–155. (in Russian)
7. Lavrov A. P. *Formirovaniye podzemnogo stoka v zone izbytochnogo uvlazhneniya (Belorussiya)* [Underground flow formation in the zone of excessive moisture]. *Rezhim, balans podzemnyh vod* [Regime, balance of ground waters]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1967, pp. 157–213. (in Russian)
8. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern global and regional climate changes]. *Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut prirodopol'zovaniya* [National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Nature Management]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, 314 p. (in Russian)
9. Loginov V. F. Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change of Belarus: reasons, consequences, regulation possibilities]. 2nd ed. Minsk, 2020, 264 p. (in Russian)
10. *Poleznye iskopaemye Belarusi: k 75-letiyu BelNIGRI* [Natural resources of Belarus: to 75 anniversary of BelSR-GEI)]. Ed. board P. Z. Homich [et al.]. Minsk, Adukacyya i vyhavanne Publ., 2002, 528 p. (in Russian)
11. *Rezhim i balans podzemnyh vod territorii Bialovezhskoj pushchi: tekhnicheskij otchet (zaklyuch.)* [Regime and balance of ground waters of the territory of Bialowieza Forest: technical report (final)]. *Belorusskaya geologo-gidrogeologicheskaya ekspediciya. Central'naya gidrogeologicheskaya partiya* [Belorussian geological and hydrogeological expedition. Central hydro geochemical party]. Head N. F. Avhimovich. Minsk, 1975, 261 p. (in Russian)
12. Shestopalov V. M. *Metody izucheniya estestvennyh resursov podzemnyh vod* [Methods of studying of natural ground waters resources]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 168 p. (in Russian)

Информация об авторах

Савич-Шемет Оксана Григорьевна – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: savichoks@yandex.ru

Андух Юлия Петровна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: jyulga@yandex.by

Пашкевич Василий Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.i.pashkevich@tut.by

Information about the authors

Oksana G. Savich-Shemet – 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: savichoks@yandex.ru

Yuliya P. Antsukh – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: jyulga@yandex.by

Vasilii Iv. Pashkevich – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: v.i.pashkevich@tut.by

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВОДЫ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ БАЗИРОВАНИЯ БЕЛОРУССКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А. Г. Бровка, А. А. Мурашко, К. А. Агутин

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Приводится информация о методах определения и полученных данных по теплофизическим характеристикам и фазовому составу воды рыхлых горных пород территории белорусской антарктической станции (БАС).

Для экспериментального исследования указанных характеристик на основе базовых разработок лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси созданы автоматизированные установки, позволяющие проводить такие исследования в условиях БАС в автономном режиме или в управлении через удаленный доступ.

В статье представлены данные по исходным и теплофизическими характеристикам, а также фазовому составу воды проб рыхлых горных пород, отобранных на территории БАС.

Ключевые слова: горные породы; мониторинг температурного режима; методы определения теплофизических характеристик; геокриологические процессы.

Для цитирования. Бровка А. Г., Мурашко А. А., Агутин К. А. Фазовый состав воды и теплофизические характеристики терригенных отложений в районе базирования белорусской антарктической станции // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 70–83.

WATER PHASE COMPOSITION AND THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF TERRIGENOUS SEDIMENTS IN THE AREA OF THE BELARUSIAN ANTARCTIC STATION

A. G. Brovka, A. A. Murashko, K. A. Agutin

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

Abstract. The paper presents information on the methods for determining and obtaining data on the thermophysical characteristics and phase composition of water of loose rock in the territory of the Belarusian Antarctic station (BAS). For experimental study of the indicated characteristics, automated installations have been created in the laboratory of physical and chemical mechanics of natural dispersed systems at the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus. They make it possible to carry out such studies under the conditions of the BAS in the autonomous mode or in control via remote access.

The paper presents data on the initial and thermophysical characteristics, as well as the phase composition of water of loose rock samples taken on the territory of the BAS.

Keywords: rocks; temperature regime monitoring; methods for determining thermophysical characteristics; geo-cryological processes.

For citation. Brovka A. G., Murashko A. A., Agutin K. A. Water phase composition and thermophysical characteristics of terrigenous sediments in the area of the Belarusian Antarctic station. *Nature Management*, 2023, no.1, pp. 70–83.

Введение. Природно-территориальные комплексы в зонах многолетнемерзлых пород являются весьма уязвимыми в отношении геоэкологической устойчивости. Это связано, прежде всего, с неустойчивостью температурного режима, зависящего от энергообмена в приземном слое атмосферы, снежном покрове и почвенно-грунтовой толще. При изменении соотношения между параметрами теплообмена под воздействием естественных и антропогенных факторов происходят изменения температурного режима, что запускает ряд неблагоприятных геокриологических явлений, таких как термокарст, криогенное растрескивание, курумообразование, криогенное пучение, солифлюкция и т. п.

Вопросы энергомассообмена в ландшафтной сфере в определенной степени проработаны для Арктической зоны Российской Федерации [1–3]. В то же время, несмотря на тенденции глобальных

изменений климатических условий и активизацию мероприятий по освоению Антарктиды, аналогичные исследования в недостаточной степени проводятся для Антарктики.

В связи с изложенными проблемами в рамках подпрограммы «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» Государственной программы «Научно-инновационная деятельность НАН Беларусь» на 2021–2025 годы выполняется задание 7 «Провести мониторинг энергомассообмена в деятельном слое земной поверхности для оценки изменения температурного режима и развития негативных геокриологических процессов в районе расположения белорусской антарктической станции (Гора Вечерняя)».

Цель указанного задания – провести мониторинг и моделирование энергомассообмена в приземном слое воздуха, снежно-ледяном покрове и подстилающей поверхности для оценки изменения температурного режима и развития негативных геокриологических процессов в районе расположения белорусской антарктической станции (БАС) под воздействием естественных и антропогенных факторов.

Известно, что наиболее неустойчивыми в геокриологическом отношении являются рыхлые горные породы. К ним можно отнести песчано-глинистые и песчано-гравийные породы терригенных и моренных отложений, которые характерны для отдельных участков территориального комплекса БАС.

Для оценки и прогноза развития неблагоприятных геокриологических явлений необходимо исследовать теплофизические характеристики горных пород в зависимости от изменения в них фазового состава воды при вариации температурного режима. Это позволяет путем численного моделирования оперативно выявлять тенденции развития геокриологических явлений в зависимости от трендов глобальных и локальных климатических факторов.

Приборы и методы исследований. Для исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды на основе базовых разработок лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларусь [4, 5] созданы автоматизированные установки, показанные на рис. 1 и 2.

Измерение и регулирование температуры калориметра 1 (см. рис. 1) осуществляется с помощью четырехканального компьютерного порта В-381Б разработки УП «УНИТЕХПРОМ БГУ» 9, в состав которого входят предусилитель, аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи. Измерение и регулирование калориметра осуществляется по следующей схеме. На первый канал АЦП подается предварительно усиленный сигнал от датчика разности температуры калориметрического и охранного стаканов. В зависимости от полярности этого сигнала, его величины и скорости его изменения на первый канал ЦАП передается управляющий сигнал и на его выходе появляется аналоговый сигнал, который подается на первый канал блока усиления мощности БУМ-4 10, питающего охранный нагреватель калориметрического стакана.

Система регулирования температуры охранного стакана организована таким образом, что она направлена на поддержание заданной разности температуры между калориметрическим и охранным стаканами. При этом разбаланс температуры охранного и калориметрического стаканов программно интегрируется и записывается в таблицу данных.

Второй канал управляет элементами, обеспечивающими оптимальный режим работы калориметра, включая холодильную камеру 5, в которую помещается калориметр.

На третий канал АЦП подается предварительно усиленный сигнал от основного датчика калориметра, расположенного в охранном стакане. Этот сигнал периодически записывается в таблицу данных. Следует отметить, что при нулевой разности температуры калориметрического и охранного стаканов сигнал, фиксируемый на третьем канале, будет точно соответствовать температуре калориметрического стакана. Для того чтобы это соответствие сохранилось и при разбалансировке регулируемой температуры, в программу введены корректирующие параметры, учитывающие величину разбалансировки.

Четвертый канал АЦП используется для согласования температурного режима крышки калориметра с температурой основного объема калориметра.

Для регулировки температурного режима холодильной камеры используется величина регулирующего сигнала нагревателя калориметра, подаваемого на первый канал АЦП, которая сравнивается с оптимальной величиной управляющего сигнала работы холодильной камеры. Далее на основании разности регулирующего сигнала нагревателя калориметра и оптимальной величиной управляющего сигнала работы холодильной камеры формируется управляющий сигнал работы холодильной камеры.

В процессе опытов компьютерная система периодически, с интервалом в 100 сек, ведет регистрацию данных и графически визуализирует текущее состояние процесса на мониторе. Для обработки полученных в процессе опыта данных в прикладной программе предусмотрен специальный модуль, позволяющий рассчитать на основании теплового баланса значения количества незамерзшей воды в исследуемом образце при различных значениях температуры.

Разработанный алгоритм автоматизации, программное и приборное обеспечение регулирования температурного режима калориметрической установки позволяют адаптировать ее эксплуатацию до двух суток в автономном режиме или с контролем через удаленный доступ.

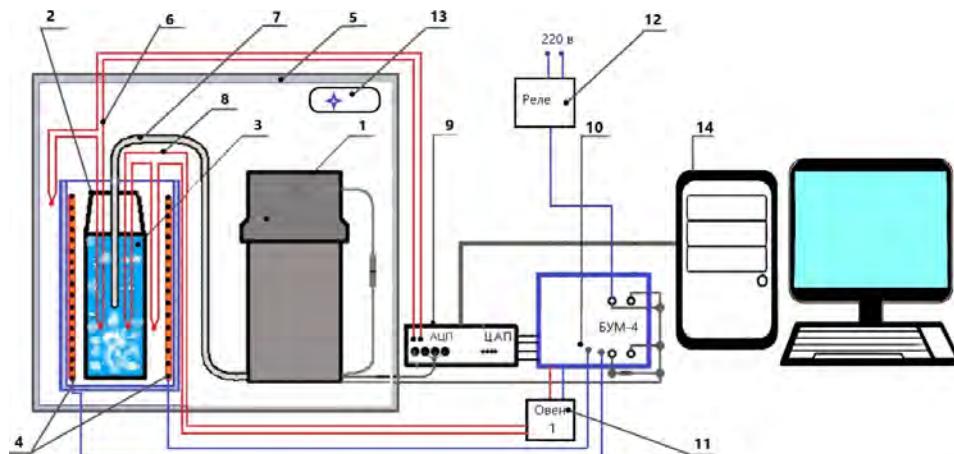


Рис. 1. Схема калориметрической установки:

1 – калориметрическая камера; 2 – ноль-термостат; 3 – сосуд Дьюара со смесью воды и льда; 4 – нагреватель ноль-термостата; 5 – холодильная камера; 6 – термопары холодильной камеры; 7 – нулевые спай батареи термопар корпуса калориметрической камеры; 8 – термопары ноль-термостата; 9 – четырехканальный компьютерный порт с АЦП и ЦАП; 10 – четырехканальный усилитель мощности; 11 – измеритель/регулятор температуры; 12 – реле включения компрессора холодильной камеры; 13 – компрессор холодильной камеры с вентилятором; 14 – система обработки данных

Fig. 1. Schematic diagram of the calorimeter device:

1 – calorimeter chamber; 2 – zero-thermostat; 3 – Dewar-vessel with water-ice mixture; 4 – heater of zero-thermostat; 5 – cooling chamber; 6 – thermocouple of cooling chamber; 7 – zero junction of thermocouple battery of calorimeter chamber housing; 8 – thermocouple of zero-thermostat; 9 – four-channel computer port with analog-to-digital (ADC) and digital-to-analog (DAC) converters; 10 – four-channel power amplifier; 11 – temperature regulator; 12 – switching relay of the refrigeration chamber compressor; 13 – refrigeration chamber compressor with a fan; 14 – data processing system

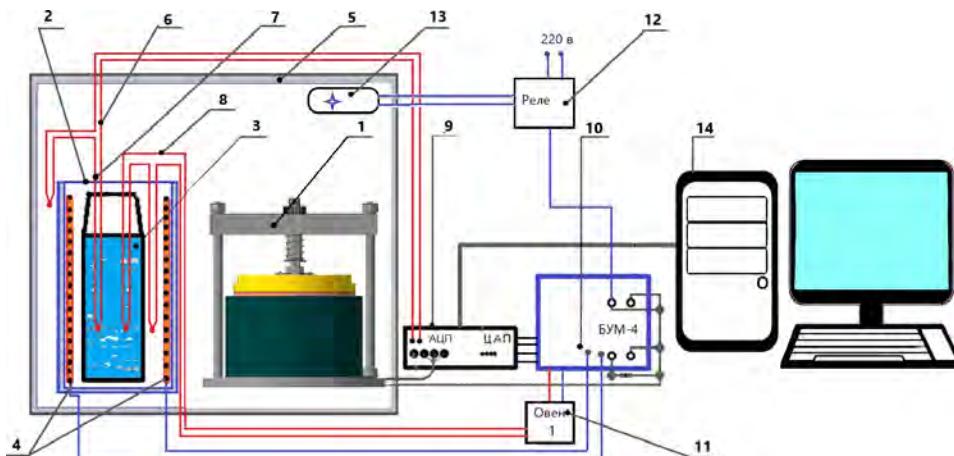


Рис. 2. Схема установки для определения коэффициентов теплопроводности грунтов:

1 – устройство для определения коэффициентов теплопроводности; 2 – ноль-термостат; 3 – сосуд Дьюара со смесью воды и льда; 4 – нагреватель ноль-термостата; 5 – холодильная камера; 6 – термопары холодильной камеры; 7 – нулевые спай батареи термопар корпуса калориметрической камеры; 8 – термопары ноль-термостата; 9 – четырехканальный блок АЦП и ЦАП; 10 – четырехканальный усилитель мощности; 11 – измеритель/регулятор температуры; 12 – реле включения компрессора холодаильной камеры; 13 – компрессор холодаильной камеры с вентилятором; 14 – система обработки данных

Fig. 2. Schematic diagram of the device for determining the coefficients of thermal conductivity of soils:

1 – device for determining heat transfer coefficients; 2 – zero-thermostat; 3 – Dewar vessel with a mixture of water and ice; 4 – heater of zero-thermostat; 5 – cooling chamber; 6 – thermocouple of cooling chamber; 7 – zero junction of thermocouple battery of calorimeter chamber body; 8 – thermocouple of the zero-thermostat; 9 – four-channel ADC and DAC unit; 10 – four-channel power amplifier; 11 – temperature controller; 12 – switching relay of the refrigerating chamber compressor; 13 – refrigerating chamber compressor with a fan; 14 – data processing system

Аналогичным образом с использованием четырехканального компьютерного порта В-381Б усовершенствована установка для определения коэффициентов теплопроводности горных пород методом стационарного температурного режима.

Разработан алгоритм последовательной смены режима термостатирования и оптимальной плотности теплового потока нагревателя данной установки. Усовершенствовано ее программное обеспечение для эксплуатации оборудования в условиях БАС в автономном режиме с контролем через удаленный доступ.

Отбор и характеристика проб горных пород. На первом этапе лабораторных исследований температуры начала замерзания, зависимостей количества незамерзшей воды от температуры, коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости при положительной и отрицательной температурах рыхлых горных пород территории БАС опыты проведены на образцах, отобранных сотрудниками 13-й Белорусской антарктической экспедиции (БАЭ) в период полевого сезона 2020–2021 гг.

В табл. 1 представлено описание проб и географические координаты их отбора. На рис. 3 можно видеть фрагмент карты участка отбора проб на 400–500 м северо-западнее мыса Доступного.

Таблица 1. Перечень проб горных пород, отобранных в 13-й Белорусской антарктической экспедиции

Table 1. List of rock samples taken during the 13th Belarusian Antarctic expedition

Номер образца	Описание образца	Географические координаты	Влагосодержание W, кг/кг
1	Терригенная песчано-гравийная смесь	S 67°39'49" E 046°10'50"	0,0590
2	Суглинок темно-серый	S 67°39'48" E 046°10'51"	0,1265
3	Супесь крупно-среднезернистая	S 67°39'49" E 046°10'54"	0,0672
4	Супесь крупно-среднезернистая	S 67°39'50" E 046°10'53"	0,0620
5	Дресвяно-гравийная смесь	S 67°39'49" E 046°10'52"	0,1033
6	Супесь темно-серая	S 67°39'26" E 046°09'56"	0,0720
7	Супесь серо-коричневая	S 67°39'26" E 046°10'01"	0,1034
8	Супесь серо-коричневая	S 67°39'28" E 046°10'06"	0,0800

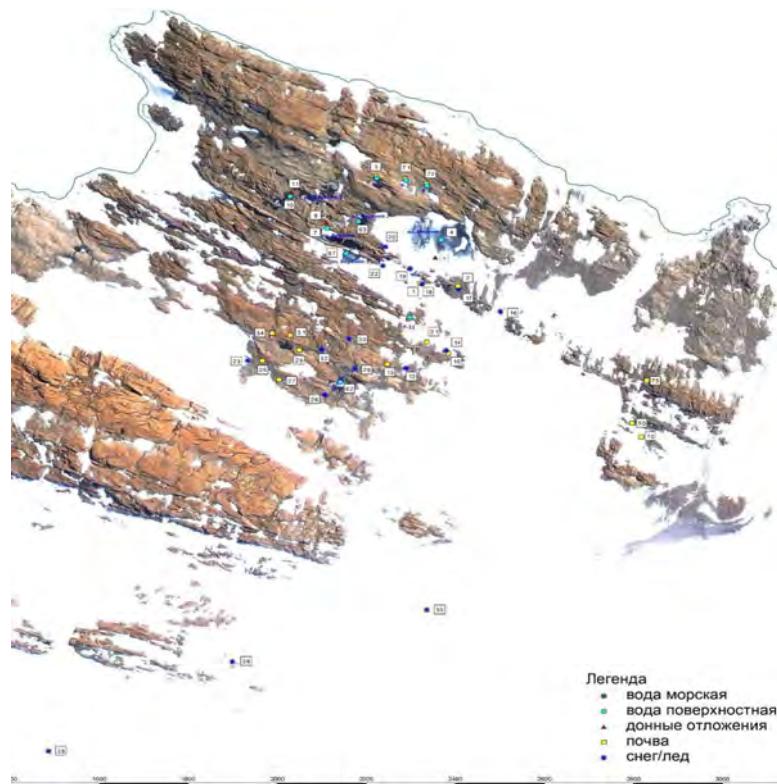


Рис. 3. Карта участка отбора проб горных пород 13-й Белорусской антарктической экспедиции

Fig. 3. Map of the rock sampling area of 13th Belarusian Antarctic expedition

По заданию 7 в процессе рекогносцировочных мероприятий 14-й БАЭ, в 500 м южнее подножия сопки Рубин, на открытом участке моренных отложений определена площадка для создания опытного полигона «Морена» с целью проведения комплексного исследования температурно-влажностного режима слоя сезонного оттаивания. Определены границы предполагаемого полигона с ориентировочными размерами (100 × 100) м (рис. 4). Углы площадки замаркированы вехами с координатами GPS (табл. 2).



Рис. 4. Площадка опытного полигона для проведения комплексного исследования температурно-влажностного режима слоя сезонного оттаивания

Fig. 4. The area of experimental polygon for carrying out the complex research of temperature-humidity regime of seasonal thawing layer

Таблица 2. Географические координаты опытной площадки Белорусской антарктической экспедиции

Table 2. Geographic coordinates of the Belarusian Antarctic expedition experimental plot

Номер репера	Широта	Долгота	Номер репера	Широта	Долгота
1	67°39'48.3"	046°10'48.4"	3	67°39'48.3"	046°10'56.1"
2	67°39'49.6"	046°10'54.2"	4	67°39'46.8"	046°10'51.0"

Согласно справочным материалам, предоставленным начальником БАЭ А. А. Гайдашовым, данная площадка (полигон) использовалась ранее при проведении научных исследований методом CALM-площадки сотрудниками Института географии Российской академии наук (2012–2013 гг.), а также российскими исследователями из Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (2018–2019 гг.). Российскими учеными на данном полигоне закладывались шурфы-разрезы и шурфы-прикопки, производился отбор проб рыхлого субстрата, определялась глубина промерзания, устанавливались термологгеры, проводились измерения альбедо подстилающей поверхности. На выбранной площадке произведено предварительное коронарное бурение верхних горизонтов многолетних мерзлых пород для отбора кернов и последующего размещения оборудования для дистанционного мониторинга теплофизических параметров грунтов в зоне экологических рисков. Произведен отбор кернов до глубины –0,6 м механизированным способом, с помощью ударно-сверлильного инструмента, рабочим инструментом которого являлась буровая алмазная коронка диаметром 50 мм.

На десяти зафиксированных на карте точках произведен отбор партий из 30 образцов породы (по 3 пробы на точке отбора) по ранее запланированной методике мелкого шурфования. Первый образец отобран с поверхностного слоя, второй – на глубине 200 мм от поверхности, а третий – на глубине от 400–500 мм. Вес каждого образца составляет от 0,5 до 1,2 кг. Координаты точек отбора горных пород 14-й БАЭ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Координаты точек отбора горных пород 14-й Белорусской антарктической экспедиции**Table 3. Coordinates of rock sampling points of the 14th Belarusian Antarctic expedition**

Координаты точек отбора образцов			Описание
Широта	Долгота	Способ отбора	
67°39'49,1"	046°10'49,9"	Шурф1	Супесь серая разнозернистая с разноразмерными включениями терригенных гальки и гравия
67°39'48,7"	046°10'48,9"	Шурф 2	Супесь серая тяжелая с редкими суглинистыми и гравийно-галечными включениями
67°39'48,5"	046°10'47,8"	Шурф 3	Серо-коричневые гравийно-галечные терригенные отложения со средне-мелкозернистым песчаным наполнителем
67°39'48,4"	046°10'46,5"	Шурф 4	Песок темно-серый с редкими включениями грубоокатанной гальки и гравия
67°39'47,4"	046°10'45,0"	Шурф 5	Супесчано-суглинистые серые отложения практически без инородных включений
67°39'47,3"	046°10'44,8"	Шурф 6	Супесь темно-серая со спорадическими гравийно-галечными включениями
67°39'47,1"	046°10'43,8"	Шурф 7	Супесь легкая темно-серая с включениями разнородного терригенного плохо окатанного материала
67°39'47,8"	046°10'47,3"	Шурф 8	Супесь темно-серая легкая с разнородными терригенными включениями
67°39'48,0"	046°10'47,9"	Шурф 9	Супесь серая с включениями терригенных гравийно-галечных отложений
67°39'48,3"	046°10'49,1'	Шурф 10	Супесь серая легкая с включениями плохо окатанной гальки и гравия
67°39'49,1"	046°10'52,1"	Керн 2	Супесь пылеватая серая с гравийно-галечными включениями
67°39'49,3"	046°10'51,5"	Керн 7	Песок средне-мелкозернистый, пылеватый с включениями слабо окатанного гравийно-галечного материала
67°39'48,9"	046°10'51,8"	Керн 8	Супесь пылеватая серая с гравийно-галечными включениями
67°39'49,1"	046°10'52,5"	Керн 9	Супесь пылеватая серая с гравийно-дресвятыми включениями
67°39'49,4"	046°10'52,3"	Керн 10	Супесь легкая серая с гравийно-галечными включениями

Результаты исследования. Для создания базового комплекса данных проведены лабораторные исследования температуры начала замерзания, зависимостей количества незамерзшей воды от температуры, коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости скелета рыхлых горных пород, отобранных при экспедиционных исследованиях в 2020–2022 гг. Основные данные по проведенным исследованиям представлены в табл. 4–7, а также на рис. 5–10. Следует отметить, что с учетом допустимого объема статьи результаты исследования образцов 14-й БАЭ представлены в основном по центральной глубине отобранных проб. Более подробные результаты с учетом отбора проб по глубине на указанных точках изложены в научном отчете по заданию А-7 за 2022 год.

Анализ полученных данных показывает, что геологические разновидности образцов в основном представляют собой смеси песчаных, гравийных и галечных компонентов с небольшими примесями глинистых пород. Несмотря на относительно небольшое влагосодержание представленных пород, температура начала замерзания в них находится вблизи стандартной температуры замерзания воды в пределах 0,02–0,17 кг/кг. Такие значения температуры начала замерзания воды свидетельствуют об отсутствии в поровых растворах исследованных горных пород минеральных солей. Наиболее низкую температуру начала замерзания –0,17 °С имеет суглинистый образец благодаря наличию глинистой фракции. Основные фазовые переходы воды в лед для практически всех исследованных образцов происходят в интервале –0,1...–3,0 °С. Для суглинка же они отмечаются в интервале –0,17...–6,0 °С.

Таблица 4. Температура начала замерзания и количество незамерзшей воды при различных температурах горных пород территории белорусской антарктической станции, отобранных 13-й Белорусской антарктической экспедицией

Table 4. Freezing start temperature and amount of unfrozen water at different rock temperatures of the Belarusian Antarctic station territory collected by the 13th Belarusian Antarctic expedition

Но- мер об- разца	Описание образца	Темпе- ратура (началь- ный замер) $t, ^\circ\text{C}$	Теплоем- кость ске- лета по- роды $C,$ Дж/кг	Количество незамерзшей воды $W_h, \text{ кг}/\text{кг}$									Параметры аппроксимации			
				Режим	Temperatura $t, ^\circ\text{C}$											
					-0,5	-1	-2	-3	-5	-10	-15	-20	a_1	a_2	n	
1	Терригенная песчано-гравийная смесь	-0,08	515	Замораживания	0,0190	0,0170	0,0160	0,0155	0,0150	0,0150	0,0145	0,014	-0,5382	0,0065	0,0125	
				Оттаивания	0,0160	0,0155	0,0150	0,0145	0,0140	0,0140	0,0140	0,014	-	-	-	
2	Суглинок темно-серый	-0,17	741	Замораживания	0,1120	0,0982	0,0724	0,0532	0,0353	0,0228	0,0180	0,0150	-0,7500	0,0600	0,0100	
				Оттаивания	0,1005	0,0895	0,0680	0,0510	0,0360	0,0223	0,0178	0,0150	-	-	-	
3	Супесь круп- но-средне-зер- нистая	-0,04	734	Замораживания	0,0109	0,0068	0,0035	0,0022	0,0009	0,0001	0,0001	0,000	-1,0000	0,0080	0,0000	
				Оттаивания	0,0080	0,0049	0,0025	0,0015	0,0007	0,0002	0,0001	0,000	-	-	-	
4		-0,02	552	Замораживания	0,0240	0,0190	0,0160	0,0150	0,0140	0,0130	0,0120	0,0120	-0,5449	0,0072	0,0110	
				Оттаивания	0,0160	0,0130	0,0123	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	-	-	-	
5	Дресвяно-гравийная смесь	-0,11	735	Замораживания	0,0762	0,0617	0,0435	0,0320	0,0230	0,0154	0,0135	0,0122	-0,6500	0,0520	0,0055	
				Оттаивания	0,0590	0,0470	0,0335	0,0270	0,0195	0,0143	0,0131	0,0122	-	-	-	
6	Супесь темно- серая	-0,04	729	Замораживания	0,0067	0,0040	0,0015	0,0010	0,0006	0,0003	0,0001	0,0001	-1,0675	0,0029	0,0000	
				Оттаивания	0,0050	0,0030	0,0012	0,0009	0,0005	0,0002	0,0001	0,0001	-	-	-	
7	Супесь серо- коричневая	-0,03	713	Замораживания	0,0156	0,0112	0,0094	0,0087	0,0079	0,0064	0,0052	0,0044	-0,7236	0,0082	0,0040	
				Оттаивания	0,0142	0,0100	0,0090	0,0086	0,0077	0,0064	0,0052	0,0044	-	-	-	
8			546	Замораживания	0,0180	0,0160	0,0150	0,0150	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	-0,5262	0,0060	0,0120	
				Оттаивания	0,0160	0,0150	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	-	-	-	

Таблица 5. Коэффициенты теплопроводности горных пород территории белорусской антарктической станции, отобранных 13-й Белорусской антарктической экспедицией

Table 5. Thermal conductivity coefficients of rocks of the Belarusian Antarctic station territory sampled by the 13th Belarusian Antarctic expedition

Номер образца	Описание образца	Географические координаты	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	$W,$ $\text{кг}/\text{кг}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda,$ $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	
					$t = 20^\circ\text{C}$	$t = -20^\circ\text{C}$
1	Терригенная песчано-гравийная смесь	S 67°39'49" E 046°10'50"	2320	0,055	1,86	2,43
2	Суглинок темно-серый	S 67°39'48" E 046°10'51"	2380	0,110	1,79	2,16
3	Супесь крупно-среднезернистая	S 67°39'49" E 046°10'54"	2470	0,067	2,18	2,93
4		S 67°39'50" E 046°10'53"	2475	0,062	2,16	2,90
5	Дресвяно-гравийная смесь	S 67°39'49" E 046°10'52"	2465	0,081	1,92	2,40
6	Супесь темно-серая	S 67°39'26" E 046°09'56"	2420	0,060	2,04	2,58
7	Супесь серо-коричневая	S 67°39'26" E 046°10'01"	2300	0,093	1,84	2,60
8		S 67°39'28" E 046°10'06"	2405	0,075	2,05	2,61

Таблица 6. Температура начала замерзания и количество незамерзшей воды при различных температурах горных пород территории белорусской антарктической станции, отобранных 14-й Белорусской антарктической экспедицией

Table 6. The temperature of the beginning of freezing and the amount of unfrozen water at different temperatures of the rocks of the Belarusian Antarctic station territory collected by the 14th Belarusian Antarctic expedition

Точка отбора	Глу-бина, см	Темпе-ратура (началь-ный замер) t , °C	Тепло-емкость скелета породы C , Дж/кг	Количество незамерзшей воды W_h , кг/кг								Параметры аппроксимации			
				Влагосо-держа-ние, кг/кг	Temperatura t , °C										
					-0,5	-1	-2	-3	-5	-10	-15	-20	a_1	a_2	n
Шурф 1	20	-0,12	643	0,076	0,0390	0,028	0,0170	0,0130	0,009	0,0060	0,005	0,0045	-0,56	0,024	0,00001
Шурф 2	20	-0,03	727	0,120	0,0643	0,0500	0,0315	0,0227	0,0162	0,0113	0,0099	0,0090	-0,85	0,035	0,0070
Шурф 3	20	-0,11	717	0,049	0,0290	0,0190	0,0130	0,0110	0,009	0,0070	0,0060	0,0055	-0,565	0,0343	0,00001
Шурф 4	20	-0,12	722	0,082	0,0609	0,0479	0,0316	0,0237	0,0170	0,0110	0,0095	0,0089	-0,78	0,035	0,0070
Шурф 5	20	-0,11	703	0,112	0,0680	0,0470	0,0270	0,0190	0,0130	0,0080	0,0080	0,0075	-0,526	0,035	0,00001
Шурф 6	20	-0,04	733	0,104	0,0615	0,0480	0,0311	0,0235	0,0167	0,0118	0,0100	0,0090	-0,78	0,03	0,007
Шурф 7	20	-0,13	674	0,108	0,0780	0,0590	0,0390	0,0320	0,0230	0,0160	0,0140	0,0130	-0,421	0,046	0,00001
Шурф 8	20	-0,13	731	0,077	0,0620	0,0468	0,0299	0,0227	0,0165	0,0114	0,0100	0,0090	-0,78	0,035	0,007
Шурф 9	20	-0,13	613	0,107	0,0630	0,0480	0,0300	0,0210	0,0140	0,0110	0,0070	0,0060	-0,565	0,0343	0,00001
Шурф 10	20	-0,03	725	0,105	0,0556	0,0428	0,0268	0,0198	0,0141	0,0099	0,0087	0,0078	-0,87	0,031	0,007
Керн 2	30	-0,06	730	0,117	0,0657	0,0493	0,0301	0,0223	0,0159	0,0111	0,0098	0,0086	-0,7	0,04	0,004
Керн 7	30	-0,06	714	0,077	0,0190	0,0120	0,0080	0,0066	0,0052	0,0042	0,0035	0,0030	-0,8	0,01	0,002
Керн 8	30	-0,07	720	0,102	0,0719	0,0557	0,0355	0,0263	0,0186	0,0124	0,0105	0,0090	-0,7	0,045	0,004
Керн 9	30	-0,07	721	0,105	0,0691	0,0513	0,0320	0,0242	0,0175	0,0123	0,0110	0,0095	-0,7	0,045	0,004
Керн 10	30	-0,11	718	0,095	0,0586	0,0441	0,0288	0,0216	0,0154	0,0109	0,0095	0,0092	-0,7	0,04	0,004

Таблица 7. Коэффициенты теплопроводности горных пород территории белорусской антарктической станции, отобранных 14-й Белорусской антарктической экспедицией**Table 7. Thermal conductivity coefficients of rocks of the Belarusian Antarctic station territory sampled by the 14th Belarusian Antarctic expedition**

Номер образца	Глубина отбора, см	Плотность, кг/м ³	W, кг/кг	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	
				$t = 20^{\circ}\text{C}$	$t = -20^{\circ}\text{C}$
1	0	2380	0,090	1,80	2,28
	20	2320	0,076	1,75	2,21
	40	2400	0,106	1,93	2,45
2	0	2315	0,070	1,54	1,81
	20	2360	0,120	1,77	2,36
	40	2300	0,131	1,72	2,09
3	0	2150	0,030	1,39	1,35
	20	2200	0,049	1,56	1,71
	40	2250	0,071	1,59	1,87
4	0	2320	0,069	1,77	2,12
	20	2350	0,0825	1,84	2,40
	40	2410	0,1040	1,92	2,47
5	0	2050	0,0524	1,14	1,10
	20	2360	0,110	1,78	2,33
	40	2380	0,108	1,84	2,39
6	0	2410	0,107	1,85	2,40
	20	2400	0,104	1,87	2,42
	40	2350	0,123	1,73	2,38
7	0	2410	0,104	1,79	2,28
	20	2360	0,108	1,86	2,47
	40	2430	0,080	1,93	2,51
8	0	2080	0,060	1,30	1,43
	20	2270	0,077	1,69	2,17
	50	2380	0,103	1,75	2,29
9	0	2100	0,075	1,15	1,15
	20	2400	0,107	1,74	2,22
	50	2400	0,104	1,77	2,30
10	0	2360	0,062	1,78	2,16
	20	2440	0,105	1,93	2,45
	40	2400	0,118	1,87	2,51
Керн 2	0–50	2330	0,119	1,73	2,39
Керн 7	0–50	2420	0,067	1,97	2,48
Керн 8	0–50	2400	0,096	1,76	2,34
Керн 9	0–50	2410	0,090	1,83	2,43
Керн 10	0–50	2430	0,082	1,92	2,45

На рис. 5–10 показаны характерные зависимости количества незамерзшей воды от температуры для некоторых точек отбора проб с различной глубиной. Из приведенных данных видно, что указанные зависимости для отдельных точек отбора, но с разной глубиной могут иметь небольшую хаотическую вариацию. Это можно объяснить соответствующей хаотической вариацией состава горных пород по глубине.

Коэффициенты теплопроводности влагонасыщенных образцов при температуре -20°C находятся в интервале 2,20–2,60 Вт/м·К. Некоторые образцы верхнего слоя с малым влагонасыщением имеют более низкую теплопроводность. В талом состоянии коэффициенты теплопроводности на 20–30 % ниже соответствующих коэффициентов при отрицательной температуре.

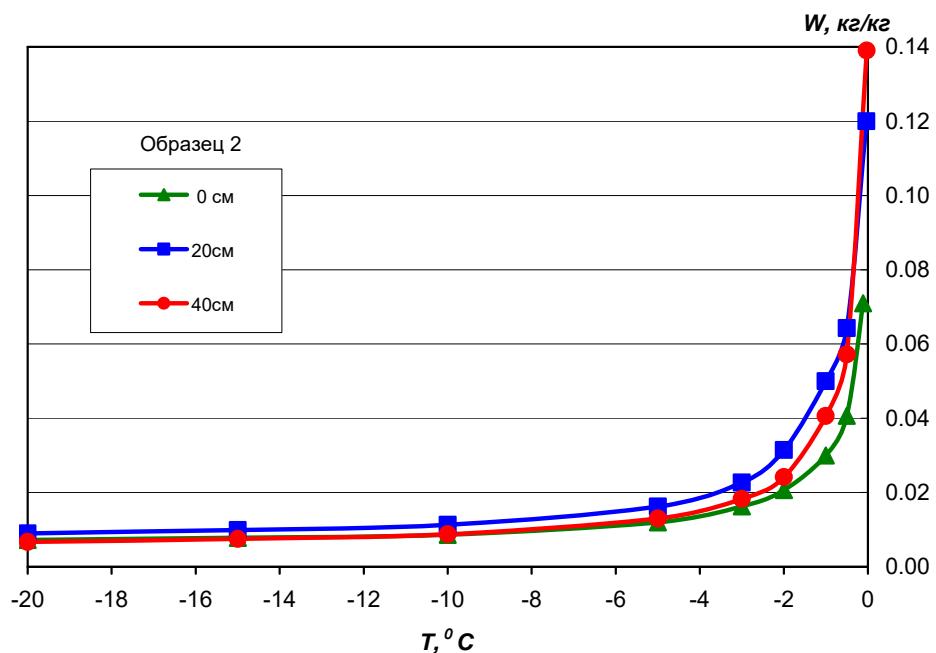


Рис. 5. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для шурфа 2, супесь серая тяжелая с редкими суглинистыми и гравийно-галечными включениями

Fig. 5. Dependence of the amount of unfrozen water on temperature for well 2, gray sandy clayey heavy with rare loamy and gravelly-pebble inclusions

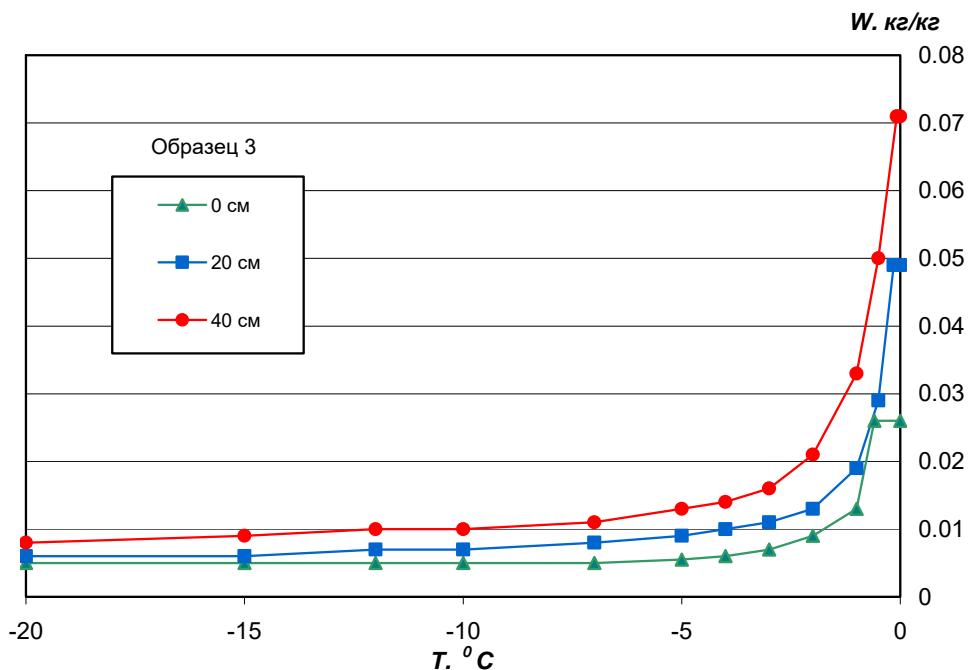


Рис. 6. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для шурфа 3, серо-коричневые гравийно-галечные терригенные отложения со средне-мелкозернистым песчаным наполнителем

Fig. 6. Dependence of the amount of unfrozen water on temperature for pit 3, gray-brown gravel and pebble terrigenous sediments with medium-fine sand filler

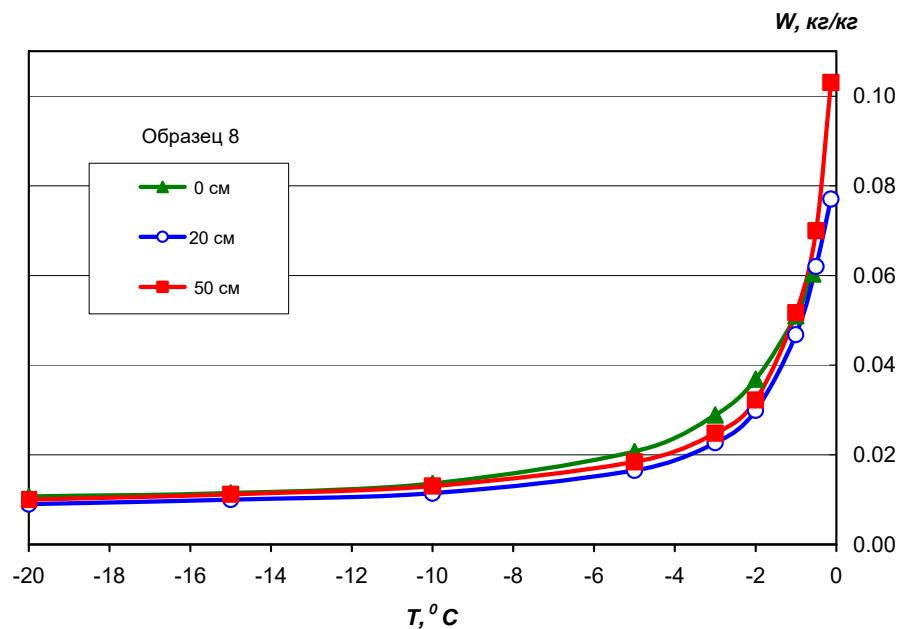


Рис. 7. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для шурфа 8, супесь темно-серая легкая с разнородными терригенными включениями

Fig. 7. Dependence of the amount of unfrozen water on temperature for well 8, dark gray light sandy loam with heterogeneous terrigenous inclusions

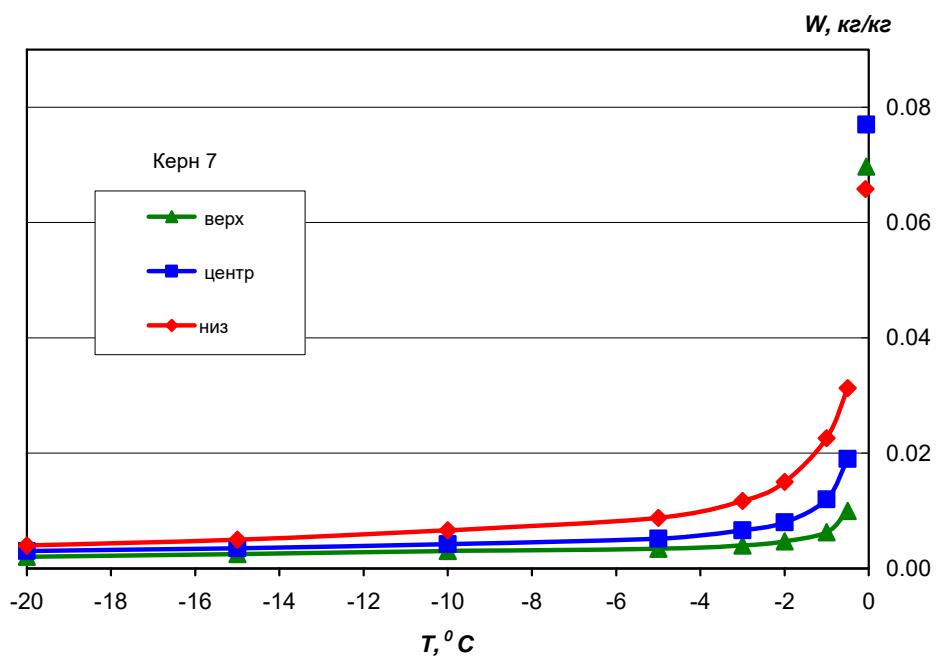


Рис. 8. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для керна 7, песок средне-мелкозернистый, пылеватый с включениями слабо окатанного гравийно-галечного материала

Fig. 8. Dependence of the amount of unfrozen water on temperature for core 7, medium-fine grained sand, dusty with inclusions of weakly rounded gravel and pebble material

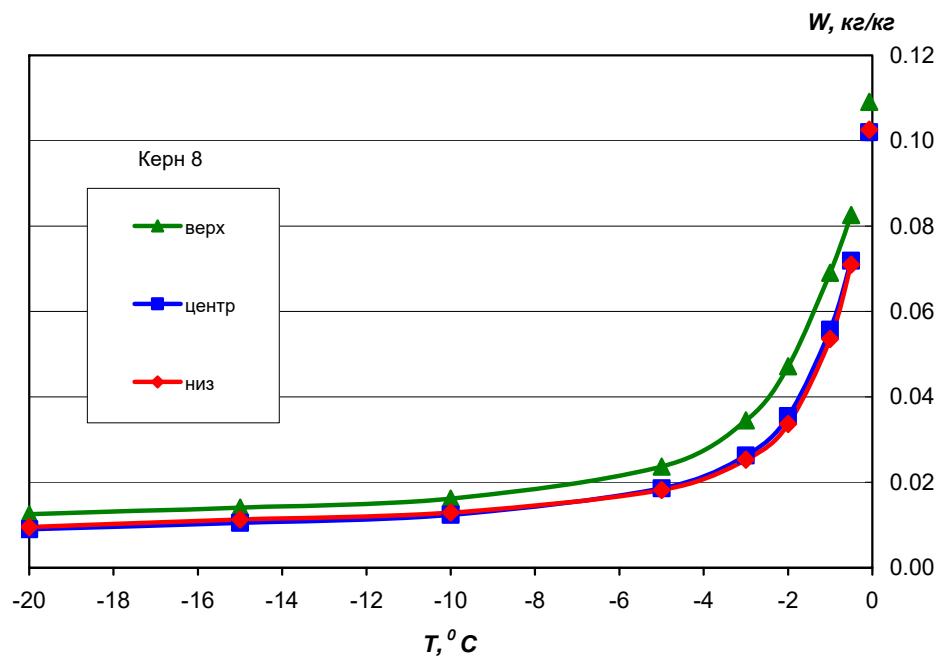


Рис. 9. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для керна 8, супесь пылеватая серая с гравийно-галечными включениями

Fig. 9. Dependence of unfrozen water quantity on temperature for core 8, dusty gray sandy loam with gravel and pebble inclusions

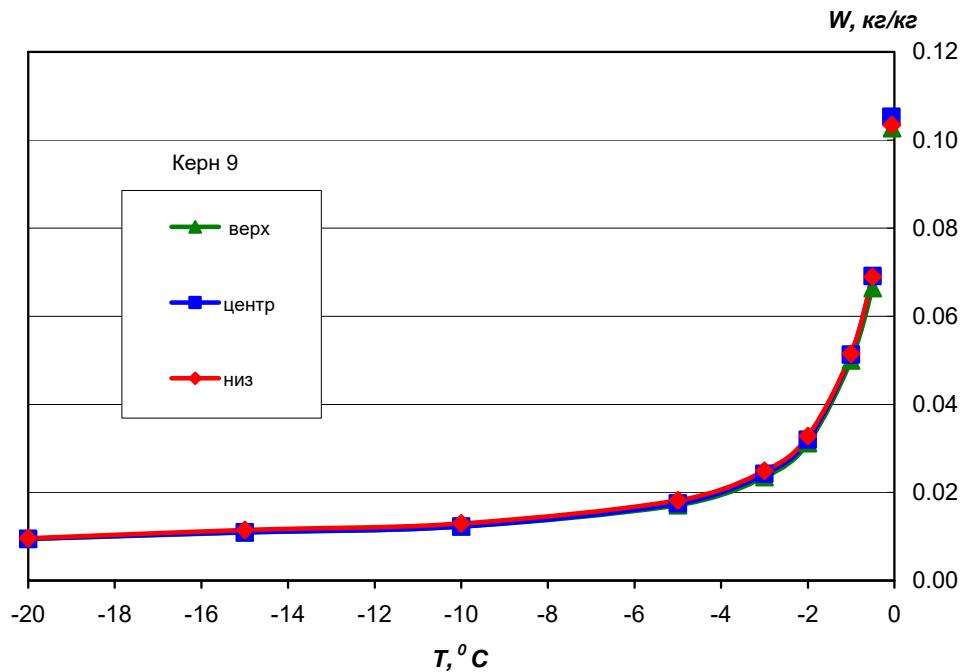


Рис. 10. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для керна 9, супесь пылеватая серая с гравийно-дресвятыми включениями

Fig. 10. Dependence of the amount of unfrozen water on temperature for core 9, dusty gray sandy loam with gravel and silt inclusions

Для аппроксимации зависимости количества незамерзшей воды в исследованных породах от температуры путем статистической обработки соответствующих экспериментальных результатов получена формула

$$W_n(t) = \frac{a_1}{(-t)^n} + a_2. \quad (1)$$

В табл. 4 и 6 представлены значения параметров аппроксимации a_1 , a_2 и n . С одной стороны, это позволяет рассчитать количество незамерзшей воды от любого значения температуры. С другой стороны, на основании данных по удельной теплоемкости скелета породы и табличных значений удельной теплоемкости воды и льда, а также по значению производной функции зависимости количества незамерзшей воды от температуры (2) можно определить эффективную объемную теплоемкость исследованных пород в любой точке исследованного диапазона температур:

$$\frac{dW_n(t)}{dt} = \frac{a_1(-n)}{(-t)^{n+1}}; \quad (2)$$

$$C_v(t) = \frac{\rho}{1+\rho} \left[C_b W_n(t) + C_l (W - W_n(t)) + C_{sk} + (L - (C_b - C_l) \cdot t) \cdot \frac{a_1(-n)}{(-t)^{n+1}} \right], \quad (3)$$

где $C_v(t)$ – эффективная объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); ρ – плотность, кг/м³; C_b – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); $W_n(t)$ – функция незамерзшей воды от температуры; C_l – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·К); C_{sk} – удельная теплоемкость скелета породы, Дж/(кг·К); L – удельная теплота фазового перехода вода – лед; t – температура, °С.

Заключение. Выполнены лабораторные исследования температуры начала замерзания, зависимости количества незамерзшей воды от температуры и теплофизических характеристик песчано-глинистых и песчано-гравийных пород терригенных и моренных отложений, отобранных на территории БАС в БАЭ 2021 и 2022 г., что позволило создать основу базового комплекса данных по теплофизическими характеристикам рыхлых горных пород. Созданный комплекс данных будет дополняться результатами аналогичных исследований образцов горных пород, отобранных последующими экспедициями.

Список использованных источников

- Павлов, А. В. Энергообмен в ландшафтной сфере Земли / А. В. Павлов. – Новосибирск : Наука, 1984. – 556 с.
- Гаврильев, Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне : справ. пособие / Р. И. Гаврильев . – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2004. – 146 с.
- Чеверев, В. Г. Природа криогенных свойств грунтов / В. Г. Чеверев. – М. : Научный мир, 2004. – 204 с.
- Бровка, А. Г. Приборы и методы исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды горных пород при отрицательных температурах / А. Г. Бровка, И. И. Романенко // Горная механика. – 2009. – № 1. – С. 71–79.
- Комплекс методов экспериментального исследования процессов тепломассопереноса и пучения в промерзающих грунтах и горных породах / Г. П. Бровка [и др.] // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ им. М. В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. – М. : Университетская книга, 2016. – Т. 3, ч. 8. – С. 11–17.

References

- Pavlov A. V. *Energoobmen v landshaftnyj sfere Zemli* [Energy exchange in the landscape sphere of the Earth Novosibirsk]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 556 p. (in Russian)
- Gavriliev R. I. *Teplofizicheskie svojstva komponentov prirodnoj sredy v kriolitozone* [Thermal-physical properties of natural environment components in the cryolithozone]. Novosibirsk, Siberian Branch of RAS Publ., 2004, 146 p. (in Russian)
- Chevrev V. G. *Priroda kriogennych svojstv gruntov* [The nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Scientific World Publ., 2004, 204 p. (in Russian)
- Brovka A. G., Romanenko I. I. *Pribory i metody issledovaniya teplofizicheskikh harakteristik i fazovogo sostava vody gornyh porod pri otricatel'nyh temperaturah* [Devices and methods of research of thermophysical characteristics and phase composition of water of rocks at negative temperatures]. *Gornaya mekhanika = Mining Mechanics*, 2009, no. 1, pp. 71–79. (in Russian)

5. Brovka G. P. [et al]. *Kompleks metodov eksperimental'nogo issledovaniya processov teplomassoperenosha i pucheniya v promerzayushchih gruntah i gornyh porodah* [Complex of methods of experimental studies of heat and mass transfer and swelling in freezing soils and rocks]. *Materialy Pyatoy konferencii geokriologov Rossii* [Proc. 5th Conf. of Russian Geocryologists]. M. V. Lomonosov Moscow State University, 14–17 June, 2016, vol. 3, part 8. Moscow, University Book Publ., 2016, pp. 11–17. (in Russian)

Информация об авторах

Бровка Андрей Геннадьевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: andrew_brovka@rambler.ru

Мурашко Андрей Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: amurbmw@tut.by

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

Information about the authors

Andrei G. Brovka – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: andrew_brovka@rambler.ru

Andrey A. Murashko – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: amurbmw@tut.bsu

Kirill A. Agutin – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ОТ СЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА И ТОПОЧНОГО МАЗУТА

Д. В. Мелех, И. П. Наркевич

Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «Бел НИЦ «Экология»
(РУП «Бел НИЦ «Экология»), Минск, Беларусь

Аннотация. Исследование направлено на повышение точности оценки выбросов парниковых газов (ПГ), что необходимо осуществлять для ключевых категорий выбросов ПГ в рамках обязательств по Рамочной конвенции об изменении климата Организации Объединенных Наций (РКИК ООН). Транспорт является ключевой категорией выбросов ПГ в национальной инвентаризации ПГ, которую Республика Беларусь выполняет с 2003 г. наряду с другими сторонами Приложения I к РКИК ООН. Доля выбросов ПГ от дорожного транспорта имеет тенденцию роста с каждым годом и начиная с 2009 г. не опускалась ниже 10 % от общенациональных выбросов ПГ без учета поглощений в лесном хозяйстве. Повышение точности оценки выполнено для выбросов CO₂ путем перехода с методологического уровня 1 на методологический уровень 2 с применением национальных коэффициентов.

Национальные коэффициенты выбросов CO₂ от потребления автомобильного топлива и топочного мазута разработаны на основании информации о содержании углерода в топливе и с применением метода массового баланса.

Результаты исследования позволяют впервые повысить методологический уровень расчетов выбросов CO₂ от потребления автомобильного топлива, переходя с уровня 1 на уровень 2.

Ключевые слова: парниковые газы; коэффициенты выбросов; содержание углерода в топливе; низкая теплотворная способность; автомобильное топливо.

Для цитирования. Мелех Д. В., Наркевич И. П. Повышение методологического уровня расчета выбросов диоксида углерода от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 84–92.

INCREASING THE METHODOLOGICAL TIER OF THE CALCULATION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM COMBUSTION OF ROAD TRANSPORTATION FUELS AND RESIDUAL FUEL OIL

D. V. Melekh, I. P. Narkevitch

The Republic Scientific and Research Unitary Enterprise "Bel RSC "Ecology"
(RUE "Bel RSC "Ecology"), Minsk, Belarus

Abstract. The research aims to improve the accuracy of estimating greenhouse gas (GHG) emissions, which needs to be done for key categories of GHG emissions under the commitments under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Transport is a key category of GHG emissions in the national GHG inventory, which the Republic of Belarus has been implementing since 2003, along with other Parties to Annex I to the UNFCCC. The share of GHG emissions from road transport tends to increase every year and since 2009 has not fallen below 10 % of total national GHG emissions, excluding removals from forestry. An increase in the accuracy of the estimate was made for CO₂ emissions by transition from methodological tier 1 to methodological tier 2 using national emission factors.

National emission factors for CO₂ from automobile fuels and residual fuel oil consumption have been developed from information on the carbon content of the fuel and using the mass balance method.

The results of the study make it possible for the first time to increase the methodological tier of calculations of CO₂ emissions from the consumption of automobile fuels and residual fuel oil by moving from tier 1 to tier 2.

Keywords: greenhouse gases, emission factors, fuel carbon content, net calorific value, automobile fuel.

For citation. Melekh D. V., Narkevitch I. P. Increasing the methodological tier of the calculation of carbon dioxide emissions from combustion of road transportation fuels and residual fuel oil. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 84–92.

Введение. Республика Беларусь в 2000 г. присоединилась к Рамочной конвенции об изменении климата Организации Объединенных Наций (РКИК ООН) [1] и тем самым приняла на себя ряд обязательств, среди которых снижение антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ). Необходимость снижения антропогенных выбросов ПГ обусловила проведение их учета, так как невозможно управлять тем, что не измеряется. Республика Беларусь как Сторона РКИК ООН, включенная в Приложение I, ежегодно выполняет инвентаризацию антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ (далее – инвентаризация ПГ), которая через Секретариат РКИК ООН сообщается Конференции Сторон (КС)¹, являющейся высшим директивным органом Конвенции [2].

Ежегодная инвентаризация ПГ верифицируется группой международных экспертов под руководством Секретариата РКИК ООН, которые оценивают ее на соответствие требованиям прозрачности, последовательности, сопоставимости, полноты и точности.

Прозрачность означает, что источники данных, допущения и методологии, используемые для инвентаризации ПГ, должны быть четко объяснены, чтобы облегчить воспроизведение и оценку инвентаризации пользователями представленной информации. Прозрачность инвентаризаций имеет основополагающее значение для успеха процесса передачи и рассмотрения информации.

Последовательность означает, что ежегодная инвентаризация ПГ должна быть внутренне последовательной для всех отчетных лет по всем элементам, секторам, категориям и газам. Инвентаризация является последовательной, если одни и те же методологии применяются для базового и всех последующих лет и если для оценки выбросов из источников или абсорбции поглотителями используются последовательные наборы данных.

Сопоставимость означает, что оценки выбросов и абсорбции, представленные Сторонами, включенными в приложение I, в их инвентаризациях должны быть сопоставимы между собой. С этой целью Сторонам,енным в приложение I, для проведения оценок и представления их инвентаризаций следует использовать методологии и форматы, согласованные КС.

Полнота означает, что ежегодная инвентаризация ПГ охватывает как минимум все источники и поглотители, а также все газы, для которых предусмотрены методологии в Руководящих принципах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) 2006 г. или для которых КС согласовала дополнительные методологии.

Точность означает, что оценки выбросов и абсорбции должны быть точными в смысле того, что они систематически не превышают и не занижают истинные выбросы или абсорбции, насколько это может быть признано, и что неопределенности снижены, насколько это практически возможно. Для повышения точности инвентаризаций должны применяться соответствующие методологии согласно Руководящим принципам МГЭИК 2006 г. [3].

Повышение точности оценок выбросов и поглощений, а также снижение их неопределенностей осуществимы путем повышения методологического уровня. Уровень – это степень методологической сложности и усилий, необходимых для оценки выбросов и поглощений ПГ. Обычно предусмотрено несколько уровней для каждой категории или вида деятельности:

1-й уровень – самый простой метод, который можно легко применить с использованием доступных исходных данных о деятельности и базовых коэффициентов выбросов;

2-й уровень – промежуточный метод с точки зрения сложности и усилий, который в большинстве случаев основан на использовании доступных исходных данных о деятельности и более детализированных или национальных коэффициентов выбросов;

3-й уровень – самый изнурительный метод с точки зрения сложности и требований к данным, основанный на использовании подробных или дезагрегированных исходных данных о деятельности непосредственно по видам источников (или поглотителей) и специализированных коэффициентов выбросов.

Уровни оценок выбросов ПГ при сжигании топлива применяются отдельно для конкретного типа топлива и типа ПГ, так как на выброс каждого ПГ при сжигании конкретного типа топлива применяется отдельный коэффициент выбросов.

Уровни 2 и 3 считаются более точными, так как они лучше отражают национальные обстоятельства инвентаризации. Однако 3-й уровень оценки не применим к выбросам CO₂ [4].

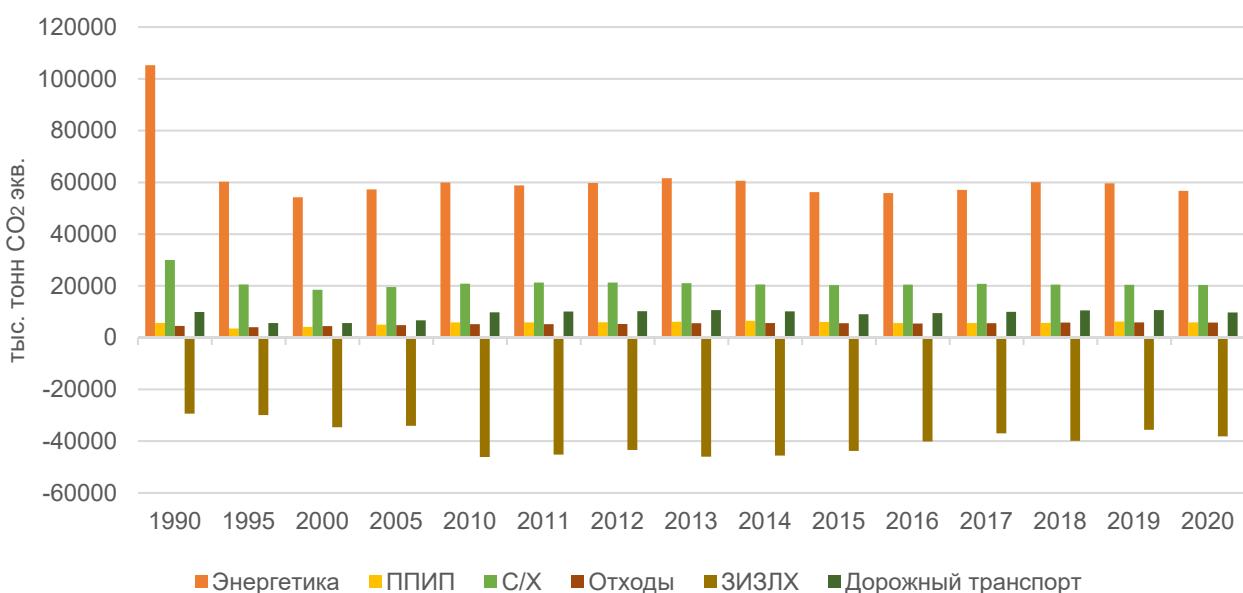
Источники антропогенных выбросов ПГ охватывают различные сферы деятельности человека, а инвентаризация ПГ осуществляется по таким секторам, как:

- энергетика;
- промышленные процессы и использование продуктов (ППИП);

¹ КС является высшим директивным органом Конвенции. Все государства, являющиеся Сторонами Конвенции, представлены на КС, на которой они рассматривают осуществление Конвенции и любых других правовых документов, принимаемых КС, и выносят решения, необходимые для содействия эффективному осуществлению Конвенции, включая институциональные и административные механизмы.

- сельское хозяйство (С/Х);
- землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство (ЗИЗЛХ);
- отходы.

Сектор «Энергетика» составляет наибольшую часть общенациональных выбросов ПГ в Республике Беларусь: в 2020 г. 63,84 % – без учета сектора «ЗИЗЛХ», в котором происходит поглощение ПГ. С учетом сектора «ЗИЗЛХ» общенациональные выбросы ПГ в 2020 г. составили количество на 6058,046 тыс. т CO₂ экв. меньшее количества выбросов в секторе «Энергетика», 50 637,084 тыс. и 56 695,084 тыс. т CO₂ экв. соответственно. Наибольшая часть выбросов ПГ в секторе «Энергетика» происходит в результате сжигания топлива с целью производства тепловой и электрической энергии, а также механической энергии, включая потребление топлива транспортом. В категории «Дорожный транспорт» более 80 % составляют выбросы от потребления автомобильного топлива дорожным транспортом. Динамика вклада выбросов ПГ от дорожного транспорта в структуру национальных выбросов и поглощений ПГ представлена на рисунке [5].



Динамика вклада выбросов ПГ от дорожного транспорта в структуру национальных выбросов и поглощений ПГ

Dynamics of the contribution of GHG emissions from road transport to the structure of national GHG emissions and removals

Дорожный транспорт с 2009 г. составляет не менее 10 % общенациональных выбросов ПГ без учета сектора «ЗИЗЛХ». Выбросы CO₂ составляют 98 % общих выбросов ПГ от потребления автомобильного топлива дорожным транспортом и являются ключевой категорией, которая по величине выбросов превышает сектора «ППИП» и «Отходы» (см. рисунок) [5].

Ключевая категория – это такая категория, которая имеет приоритет в рамках системы национальной инвентаризации, поскольку ее оценка оказывает значительное влияние на общую национальную инвентаризацию ПГ в исчислении абсолютного уровня, тенденции или неопределенности в выбросах и поглощениях. Всякий раз, когда используется понятие «ключевая категория», оно включает в себя категории как источников, так и поглотителей [6].

Цель работы – повышение точности оценок выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и мазута путем повышения методологического уровня с 1 до 2.

Задачи работы – разработка национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и мазута.

Методы исследования. В процессе горения топлива большая часть углерода выбрасывается в виде CO₂, при этом количество выбросов CO₂ зависит от величины содержания углерода в конкретном виде топлива и не зависит от технологии сжигания [7]. Детализированный или национальный коэффициент выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и мазута разработан на основании известного

значения содержания углерода в указанных видах топлива с применением коэффициентов пересчета углерода в углекислый газ и коэффициента окисления углерода.

Разработка национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и мазута. В Республике Беларусь производство автомобильного топлива и мазута осуществляется на предприятиях Белорусского государственного концерна по нефти и химии (концерн «Белнефтехим»). В табл. 1 представлена статистика по производству, импорту, экспорту и потреблению автомобильного топлива и топочного мазута, которая приведена из Энергетического баланса Республики Беларусь и указывает на производство рассматриваемых видов топлива в количествах, значительно превышающих их потребление в стране [8]. Биодизельное топливо не рассматривается, так как выбросы CO₂ от его сжигания не включаются в общенациональные выбросы ПГ [9].

Таблица 1. Баланс автомобильного топлива и топочного мазута в Республике Беларусь, 2015–2020 гг., тыс. т

Table 1. Balance of automobile fuels and residual fuel oil in the Republic of Belarus, 2015–2020, thousand tonnes

Показатель	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Баланс бензина автомобильного						
Производство	3971	3621	3546	3419	2990	3224
Импорт	35	206	108	20	4	2
Экспорт	2841	2621	2411	2163	1662	1815
Изменение запасов (+/-)	-12	-14	-11	+7	+3	-97
<i>Потреблено в Республике Беларусь</i>	<i>1153</i>	<i>1192</i>	<i>1232</i>	<i>1283</i>	<i>1335</i>	<i>1314</i>
В том числе:						
израсходовано организациями	394	385	401	407	405	515
отпущено населению	759	807	831	876	930	799
Баланс топлива дизельного						
Производство	7669	6320	6083	6111	6275	5826
Импорт	176	693	790	209	—	7
Экспорт	5359	4429	3855	3128	3184	3011
Изменение запасов (+/-)	+61	+26	-190	-164	-100	-19
<i>Потреблено в Республике Беларусь</i>	<i>2547</i>	<i>2610</i>	<i>2828</i>	<i>3028</i>	<i>2991</i>	<i>2803</i>
В том числе:						
израсходовано организациями	2061	2073	2224	2311	2294	2232
отпущено населению	486	537	604	717	697	571
Газы углеводородные сжиженные						
Производство	535	419	481	562	390	399
Импорт	61	65	251	177	90	18
Экспорт	446	346	591	601	344	281
Изменение запасов (+/-)	+4	+11	+4	+1	-2	-1
<i>Потреблено в Республике Беларусь</i>	<i>154</i>	<i>149</i>	<i>145</i>	<i>139</i>	<i>134</i>	<i>135</i>
В том числе:						
израсходовано организациями	38	34	34	31	29	27
отпущено населению	116	115	111	108	105	108
Баланс топочного мазута						
Производство	6739	5062	4794	5017	4009	3209
Импорт	211	38	—	—	—	—
Экспорт	6339	4489	4092	4395	3725	2441
Изменение запасов (+/-)	+19	-6	-111	-256	+7	-35
<i>Потреблено в Республике Беларусь</i>	<i>630</i>	<i>605</i>	<i>591</i>	<i>366</i>	<i>291</i>	<i>733</i>
В том числе:						
израсходовано организациями	630	605	591	366	291	733
отпущено населению	—	—	—	—	—	—

Республиканским научно-исследовательским унитарным предприятием «Бел НИЦ «Экология» (РУП «Бел НИЦ «Экология») в 2021 г. при сборе исходных данных для подготовки отчетности в рамках обязательств Беларусь по РКИК ООН был подготовлен запрос, который направлен Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды в концерн «Белнефтехим», о коэффициентах низшей теплотворной способности и содержания углерода в производимых дизельном топливе, бензине автомобильном, сжиженном газе и топочном мазуте. Запрошенная информация была представлена письмом от 12.10.2021 № 09-02/6148-2 в адрес РУП «Бел НИЦ «Экология», где низшая теплотворная способность

топлива указана в кДж/кг, а содержание углерода – в процентах от массы топлива, которые переведены в единицы измерения, используемые в Руководящих принципах МГЭИК 2006 г.: ТДж/тыс. т – для низшей теплотворной способности и т/ТДж – для содержания углерода в топливе. Для коэффициентов, представленных в диапазоне значений, применен средний показатель согласно эффективной практике Руководящих принципов МГЭИК 2006 г. [10]. Полученные национальные коэффициенты низшей теплотворной способности и содержания углерода в дизельном топливе, бензине автомобильном, сжиженном газе и топочном мазуте представлены в табл. 2 в сравнении коэффициентами по умолчанию Руководящих принципов МГЭИК 2006 г.

Таблица 2. Полученные национальные коэффициенты низшей теплотворной способности и содержания углерода в автомобильном топливе и топочном мазуте

Table 2. The obtained country specific factors of net calorific value and carbon content for automobile fuels and residual fuel oil

Топливо	Коэффициенты низшей теплотворной способности, ТДж/тыс. т		Коэффициенты содержания углерода в топливе, т/ТДж	
	национальные	по умолчанию [11]	национальные	по умолчанию [12]
Бензин автомобильный	43,20	44,30	19,70	18,90
Дизельное топливо	43,30	43,00	20,10	20,20
Сжиженный углеводородный газ	46,42	47,30	17,70	17,20
Топочный мазут	40,23	40,40	21,75	21,10

Коэффициенты выбросов CO₂ для всех уровней оценок отражают полное содержание углерода в топливе без содержания любых неокисленных включений углерода в золе, саже или твердых частицах. В отличие от некоторых твердых топлив, доля этих включений для жидкого топлива невелика и предполагается, как правило, полное окисление углерода, содержащегося в топливе (коэффициент окисления углерода равен 1) [13].

Национальный коэффициент выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и мазута разработан с использованием полученного значения содержания углерода в указанных видах топлива и применением следующей формулы, учитывая предположение, что весь содержащийся в топливе углерод полностью окисляется в CO₂:

$$EF_{CO_2} = CCF \cdot COF \cdot 44 / 12,$$

где EF – коэффициент выбросов CO₂ (*Emission Factor*); CCF – коэффициент содержания углерода (*Carbon Content Factor*); COF – коэффициенты окисления углерода (*Carbon Oxidation Factor*); 44/12 – коэффициент пересчета углерода в углекислый газ (молекулярный вес, г/моль: C – 12, O₂ = 2 · 16 = 32, CO₂ = 12 + 32 = 44).

Полученные коэффициенты выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута приведены в табл. 3 в сравнении коэффициентами по умолчанию Руководящих принципов МГЭИК 2006 г.

Таблица 3. Полученные национальные коэффициенты выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута

Table 3. The obtained country specific CO₂ emission factors for Combustion of automobile fuels and residual fuel oil

Топливо	Коэффициенты выбросов CO ₂ , кг/ТДж	
	национальные	по умолчанию [12]
Бензин автомобильный	72 200	69 300
Дизельное топливо	73 700	74 100
Сжиженный углеводородный газ	64 900	63 100
Топочный мазут	79 750	77 400

Переход на расчет выбросов CO₂ от стационарного сжигания автомобильного топлива и топочного мазута по уровню 2 впервые осуществлен при подготовке национальной инвентаризации ПГ Республики Беларусь за 1990 – 2020 гг., которая подана в Секретариат РКИК ООН в 2022 г. (инвентаризация 2022 г.). Для расчетов по уровню 1 ранее применялись коэффициенты низшей теплотворной способности (табл. 2) по умолчанию и коэффициенты выбросов CO₂ (табл. 3) по умолчанию от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута.

Таблица 4. Влияние на общенациональные выбросы ПГ перехода на методологию уровня 2 при оценке CO₂ от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута

Table 4. Impact on national GHG emissions of transition to the tier 2 methodology in estimating CO₂ from combustion of automotive fuels and residual fuel oil

Год	Сектор							Общенациональные выбросы ПГ без учета сектора «ЗИЗЛХ», CO ₂ экв.		
	«Энергетика»				«ППИП», CO ₂ экв.	«С/Х», CO ₂ экв.	«ЗИЗЛХ», CO ₂ экв.			
	CO ₂ (расчет по базов. коэффи.)	CO ₂ (расчет по нац. коэффи.)	CH ₄ (CO ₂ экв.)	N ₂ O (CO ₂ экв.)						
1990	99 078,37	100 231,08	3460,99	875,85	5667,74	29 991,43	-29 399,08	4513,54	143 587,91	144 740,63
1991	95 377,84	96 453,57	3316,37	904,20	5501,93	28 756,90	-29 629,99	4458,34	138 315,58	139 391,31
1992	85 567,89	86 304,85	3280,89	815,25	5071,04	26 009,93	-28 382,00	4245,00	124 990,00	125 726,96
1993	74 295,27	74 880,06	3127,78	858,90	4002,48	25 015,97	-21 736,97	4120,44	111 420,83	112 005,62
1994	62 851,34	63 381,57	2983,41	562,98	3255,59	21 797,22	-30 159,71	4065,92	95 516,46	96 046,69
1995	55 761,88	56 201,40	2845,87	511,28	3558,40	20 533,55	-29 937,29	4038,81	87 249,78	87 689,30
1996	56 668,99	57 065,74	2862,24	514,70	3546,37	20 430,74	-29 386,13	4073,83	88 096,87	88 493,63
1997	56 178,53	56 482,09	2960,37	515,69	3754,41	20 765,99	-28 696,24	4169,64	88 344,64	88 648,19
1998	54 493,71	54 776,04	2918,73	499,27	4149,85	23 374,04	-27 240,21	4268,70	89 704,30	89 986,63
1999	52 707,84	52 957,63	2940,84	474,85	4352,64	19 130,76	-33 388,00	4343,60	83 950,54	84 200,33
2000	49 981,42	50 156,75	3119,29	471,01	4171,99	18 522,00	-34 637,77	4447,87	80 713,57	80 888,90
2001	49 141,68	49 311,17	3083,44	458,15	4140,06	18 261,55	-33 718,63	4374,29	79 459,18	79 628,66
2002	49 004,61	49 152,66	3101,57	446,35	4151,80	17 755,43	-32 113,99	4402,53	78 862,29	79 010,34
2003	49 563,52	49 689,93	3124,34	456,44	4511,60	18 403,91	-29 461,68	4487,53	80 547,35	80 673,76
2004	52 533,05	52 651,53	3200,96	476,75	4686,52	18 735,17	-31 979,99	4606,53	84 238,97	84 357,45
2005	53 068,96	53 166,70	3176,79	518,30	4985,83	19 547,77	-34 074,53	4799,62	86 097,27	86 195,01
2006	55 322,81	55 433,74	3296,56	566,11	5323,61	20 043,21	-36 809,91	4878,19	89 430,49	89 541,42
2007	53 767,42	53 827,77	3220,54	577,39	5530,30	19 753,24	-39 149,68	5011,12	87 860,02	87 920,36
2008	56 297,93	56 377,26	3245,13	641,80	5669,05	20 358,54	-39 543,53	5081,21	91 293,66	91 372,99
2009	53 984,82	54 201,40	3068,07	555,79	5595,77	20 826,96	-42 718,46	4981,74	89 013,16	89 229,74
2010	55 700,90	55 763,95	3237,46	534,53	5877,42	20 828,11	-46 146,22	5171,11	91 349,53	91 412,58
2011	54 698,42	54 746,10	3133,40	577,54	5856,31	21 288,09	-45 228,00	5217,39	90 771,15	90 818,83
2012	54 382,79	54 461,96	3128,12	420,66	5945,20	21 261,02	-43 446,62	5280,36	90 418,15	90 497,32
2013	56 670,25	56 731,05	3018,23	557,22	6136,94	21 017,85	-46 019,84	5565,81	92 966,28	93 027,08
2014	56 147,75	56 209,09	3047,26	538,57	6475,94	20 548,50	-45 602,42	5646,32	92 404,34	92 465,67
2015	52 139,92	52 202,53	2946,64	499,98	6035,85	20 306,07	-43 808,66	5560,91	87 489,36	87 551,97
2016	52 381,50	52 451,47	2906,72	493,18	5652,53	20 456,86	-40 113,54	5476,46	87 367,25	87 437,22
2017	53 360,26	53 416,12	3027,31	538,89	5638,71	20 764,15	-36 961,14	5583,04	88 912,38	88 968,23
2018	56 302,99	56 357,30	3047,87	564,20	5687,97	20 453,68	-39 912,39	5834,67	91 891,39	91 945,70
2019	56 097,63	56 145,74	3065,22	555,40	6190,10	20 443,93	-35 630,21	5897,35	92 249,63	92 297,74
2020	52 900,16	52 982,56	3125,72	531,51	5903,08	20 374,13	-38 164,97	5829,72	88 664,32	88 746,72
Тренд 1990–2020, %	-46,61	-47,14	-9,69	-39,31	4,15	-32,07	29,82	29,16	-38,25	-38,69

Как видно из расчетов, приведенных в табл. 4, переход на методологию уровня 2 при оценке CO₂ от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута показывает в 2020 г. увеличение сокращения общенациональных выбросов ПГ без учета сектора «ЗИЗЛХ» на 0,44 % (-38,25 % и -38,69 %). Также неопределенность оценок выбросов, исключая сектор «ЗИЗЛХ», снизилась после перехода на методологию уровня 2 с 3,30 до 3,22 % в соответствии с данными национальной инвентаризации ПГ за 1990–2019 гг., поданной в Секретариат РКИК ООН в 2021 г. [14], и национальной инвентаризации ПГ за 1990–2020 гг., поданной в Секретариат РКИК ООН в 2022 г. [15].

Переход на методологию уровня 2 при оценке выбросов CO₂ от стационарного сжигания автомобильного топлива и топочного мазута приводит к снижению уровня общенациональных выбросов ПГ без учета «ЗИЗЛХ» по отношению к 1990 г., который является базовым для инвентаризации ПГ [3]. Это обусловлено тем, что в 1990 г. более половины выработанной энергии получено от сжигания мазута и в последующие годы происходило его замещение природным газом. В национальной инвентаризации ПГ Республики Беларусь за 1990–2020 гг., поданной в Секретариат РКИК ООН в 2022 г., значения выбросов CO₂ от стационарного сжигания автомобильного топлива и топочного мазута пересчитаны за все годы, так как это требуется для обеспечения согласованности (последовательности) оценок выбросов и поглощений ПГ во всем временном ряду.

Применение национальных коэффициентов выбросов для категорий источников с наибольшим вкладом в объединенную неопределенность позволяет снизить неопределенность национальной инвентаризации.

Заключение. Впервые разработаны национальные коэффициенты выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута, основанные на содержании углерода в топливе, производимом и потребляемом в Республике Беларусь с учетом предположения, что весь содержащийся в топливе углерод полностью окисляется в CO₂. Применение полученных национальных коэффициентов позволяет перейти на методологию уровня 2 при оценке выбросов CO₂ от сжигания автомобильного топлива и топочного мазута, которые с 2009 г. составляют не менее 10 % общенациональных выбросов ПГ без учета сектора «ЗИЗЛХ». Переход на методологию уровня 2 и использование национального коэффициента способствуют повышению качества инвентаризации и точности оценок выбросов ПГ, а также снижению неопределенностей оценок выбросов ПГ и уровня общенациональных выбросов по отношению к базовому году.

Полученные результаты внедрены в национальную инвентаризацию ПГ Республики Беларусь за 1990–2020 гг., предоставленную в Секретариат РКИК ООН в 2022 г. Описание разработки национального коэффициента будет включено в национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, с целью повышения его прозрачности для обеспечения постоянного роста качества национальной инвентаризации.

Список использованных источников

1. Об одобрении Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь от 10 апр. 2000 г. № 177 // ЭТАЛОН-ONLINE. – Режим доступа: https://etalonline.by/document/?regnum=p30000177&q_id=2118916. – Дата доступа: 04.01.2023.
2. О реализации положений Парижского соглашения к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 9 марта 2021 г. № 137 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь «Pravo.by». – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C22100137>. – Дата доступа: 04.01.2023.
3. Решение Конференции Сторон Рамочной Конвенции об Изменении Климата Организации Объединенных Наций 24/CP.19 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/rus/10a03r.pdf>. – Дата доступа: 04.01.2023.
4. Мелех, Д. В. Переход на методологию уровня 2 при оценке выбросов диоксида углерода от стационарного сжигания природного газа / Д. В. Мелех // Природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 125–134.
5. Таблицы общего формата отчетности государственного кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов Республики Беларусь, 1990–2020 гг. [Электронный ресурс] // Секретариат РКИК ООН. – Режим доступа: <https://unfccc.int/documents/461954>. – Дата доступа: 04.01.2023.
6. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Т. 1 : Общие руководящие указания и отчетность, гл. 4 : Методологический выбор и определение ключевых категорий. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/1_Volume1/V1_4_Ch4_MethodChoice.pdf#page=5. – Дата доступа: 04.01.2023.
7. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Т. 2 : Энергетика, гл. 1 : Введение. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf#page=6. – Дата доступа: 04.01.2023.
8. Энергетический баланс Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_39984/. – Дата доступа: 04.01.2023.
9. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Т. 2 : Энергетика, гл. 3 : Мобильное сжигание топлива. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf#page=51. – Дата доступа: 05.01.2023.
10. Общий обзор [Электронный ресурс] // Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf#page=15. – Дата доступа: 05.01.2023.
11. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Т. 2 : Энергетика, гл. 1 : Введение. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf#page=20. – Дата доступа: 17.04.2023.

12. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Т. 2 : Энергетика, гл. 1 : Введение. – Режим доступа: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf#page=25. – Дата доступа: 17.04.2023.
13. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] / Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006. – Т. 2 : Энергетика, гл. 2 : Стационарное сжигание топлива. – Режим доступа: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf#page=14. – Дата доступа: 04.01.2023.
14. Национальный отчет о государственном кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов Республики Беларусь, 1990–2019 гг. [Электронный ресурс] // Секретариат РКИК ООН. – Режим доступа: <https://unfccc.int/documents/273516>. – Дата доступа: 17.04.2023.
15. Национальный отчет о государственном кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов Республики Беларусь, 1990–2020 гг. [Электронный ресурс] // Секретариат РКИК ООН. – Режим доступа: <https://unfccc.int/documents/461960>. – Дата доступа: 17.04.2023.

References

1. *Ob odobrenii Ramochnoy konventsii Organizatsii Ob'yedinennykh Natsiy ob izmenenii klimata* [Electronic resource] : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus ot 10 apr. 2000 g. № 177 [On approval of the United Nations Framework Convention on Climate Change: Decree of the President of the Republic of Belarus, 10.04.2000, no. 177]. Available at: https://et-alonline.by/document/?regnum=p30000177&q_id=2118916 (accessed 4 January 2023). (in Russian)
2. *O realizatsii polozhenii Parizhskogo soglasheniya k Ramochnoy konventsii Organizatsii Ob'yedinennykh Natsiy ob izmenenii klimata* [Electronic resource] : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 9 marta 2021 g. № 137 [On the implementation of the provisions of the Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 09.03.2021, no. 137]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C22100137> (accessed 4 January 2023). (in Russian)
3. *Resheniye konferentsii storon Ramochnoy konventsii ob izmenenii klimata Organi-zatsii Ob'yedinennykh Natsiy 24/CP.19* [Decision of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change 24/CP.19] [Electronic resource]. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/rus/10a03r.pdf> (accessed 4 January 2023). (in Russian)
4. Melekh D. V. *Perekhod na metodologiyu urovnya 2 pri otsenke vybrosov dioksida ugleroda ot statcionarnogo szhiganiya prirodnogo gaza* [Transition to the tier 2 methodology for estimating carbon dioxide emissions from stationary combustion of natural gas]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2020, no. 2, pp. 125–314. (in Russian)
5. *Tablitsy obshchego formata otchetnosti gosudarstvennogo kadastra antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbsii poglotitelyami parnikovykh gazov Respubliki Belarus'*, 1990–2020 gg. [The common reporting format tables of the state cadastre of anthropogenic emissions from sources and absorption by sinks of greenhouse gases of the Republic of Belarus, 1990–2020] [Electronic resource]. Available at: <https://unfccc.int/documents/461954> (accessed 4 January 2023). (in Russian)
6. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories, 2006, vol. 1. General Guidance and Reporting, chapter 4. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/1_Volume1/V1_4_Ch4_MethodChoice.pdf#page=5 (accessed 4 January 2023). (in Russian)
7. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK*. [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories, 2006, vol. 2. Energy, chapter 1. Introduction. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf#page=6 (accessed 4 January 2023). (in Russian)
8. *Energeticheskiy balans Respubliki Belarus'*. *Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus'* [Energy balance of the Republic of Belarus. National Statistical Committee of the Republic of Belarus] [Electronic resource]. Available at: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_39984/ (accessed 4 January 2023). (in Russian)
9. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories, 2006, vol. 2. Energy, chapter 3. Mobile Combustion. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf#page=51 (accessed 17 April 2023). (in Russian)
10. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories, 2006, Overview. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf#page=15 (accessed 4 January 2023). (in Russian)
11. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories, 2006, vol. 2. Energy, chapter 1. Introduction. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf#page=20 (accessed 17 April 2023). (in Russian)
12. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories,

- 2006, vol. 2. Energy, chapter 1. Introduction. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf#page=25 (accessed 17 April 2023). (in Russian)
13. *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC] [Electronic resource]. Methodological Choice and Identification of Key Categories, 2006, vol. 2. Energy, chapter 2. Stationary Combustion. Available at: https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf#page=14 (accessed 4 January 2023). (in Russian)
14. *Otchet o gosudarstvennom kadastro antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtii poglotitelyami parnikovykh gazov Respubliki Belarus'*, 1990–2020 gg. [The report of the state cadastre of anthropogenic emissions from sources and absorption by sinks of greenhouse gases of the Republic of Belarus, 1990–2020] [Electronic resource]. Available at: <https://unfccc.int/documents/273516> (accessed 17 April 2023). (in Russian)
15. *Otchet o gosudarstvennom kadastro antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtii poglotitelyami parnikovykh gazov Respubliki Belarus'*, 1990–2020 gg. [The report of the state cadastre of anthropogenic emissions from sources and absorption by sinks of greenhouse gases of the Republic of Belarus, 1990–2020] [Electronic resource]. Available at: <https://unfccc.int/documents/461960> (accessed 17 April 2023). (in Russian)

Информация об авторах

Мелех Дмитрий Владимирович – заместитель заведующего отделом международного научного сотрудничества и климата, РУП «Бел НИЦ «Экология» (ул. Якубова, 76, 220095, г. Минск, Беларусь). E-mail: melekhdim@gmail.com

Наркевич Иван Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий отделом международного научного сотрудничества и климата, РУП «Бел НИЦ «Экология» (ул. Якубова, 76, 220095, г. Минск, Беларусь). E-mail: ivan.narkevitch@mail.ru

Information about the authors

Dmitry V. Melekh – Deputy Head of the Department of International Scientific Cooperation and Climate, RUE "Bel SRC "Ecology" (Yakubova Str., 76, 220095, Minsk, Belarus). E-mail: melekhdim@gmail.com

Ivan P. Narkevitch – D. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of International Scientific Cooperation and Climate, RUE "Bel SRC "Ecology" (Yakubova Str., 76, 220095, Minsk, Belarus). E-mail: ivan.narkevitch@mail.ru

ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КРУПНОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ ВИТЕБСКА)

П. А. Галкин

*Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет,
Витебск, Беларусь*

Аннотация. Представлены методика и алгоритм оценки и картографирования геоэкологических условий городской территории, включающие анализ и оценку геоэкологической обстановки и комфорта среды проживания населения, полученные с применением теории нечетких множеств, а также геоэкологического потенциала геосистем, рассчитанного с использованием параметров их устойчивости к техногенным воздействиям и степени нарушенности. В качестве операционных единиц анализа использованы природно-технические системы, выделенные путем наложения карт природных (литологических, геоморфологических, гидрогеологических и др.) условий и функционального зонирования территории города. Разработанная методика реализована на примере г. Витебска с построением серии геоэкологических карт, включая интегральную карту геоэкологических условий города, отражающую дифференциацию города на различные классы геоэкологических условий и по выявленным геоэкологическим ограничениям для жизнедеятельности населения и риску заболеваемости населения. Данная методика универсальна, она может быть использована для различных городских территорий с любым набором факторов, определяющих состояние природно-технических систем, при любой степени урбанизации как вручном, так и машинном способах обработки информации.

Ключевые слова: город; природно-техническая система; техногенные воздействия; геоэкологическая обстановка; комфортность городской среды; геоэкологический потенциал; геоэкологические условия; оценка; картографирование.

Для цитирования. Галкин П. А. Оценка и картографирование геоэкологических условий на территории крупного города (на примере Витебска) // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 93–112.

ASSESSMENT AND MAPPING OF GEOECOLOGICAL CONDITIONS ON THE TERRITORY OF A LARGE CITY (ON THE EXAMPLE OF VITEBSK)

P. A. Galkin

Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Vitebsk, Belarus

Abstract. The main topic of the study is the methodology and algorithm for assessing and mapping the geoecological conditions of an urban area, which include the analysis and assessment of the geoecological situation and the comfort of the living environment of the population, obtained using the theory of fuzzy sets, as well as the geoecological potential of geo-ecosystems, calculated using the parameters of their resistance to technogenic impacts. and degree of impairment. As operational units of analysis, natural-technical systems are used, identified by overlaying maps of natural (lithological, geomorphological, hydrogeological, etc.) conditions and functional zoning of the city territory. The developed methodology was implemented on the example of the city of Vitebsk with the construction of a series of geoecological maps, including an integral map of the geoecological conditions of the city, reflecting the differentiation of the city into different classes of geoecological conditions and according to the identified geoecological restrictions for the life of the population and the risk of morbidity of the population. This technique is universal, it can be used for various urban areas with any set of factors that determine the state of natural and technical systems, for any degree of urbanization, both in manual and machine methods of information processing.

Keywords: city; natural and technical system; technogenic impacts; geoecological situation; comfort of the urban environment; geoecological potential; geoecological conditions; grade; mapping.

For citation. Galkin P. A. Assessment and mapping of geoecological conditions on the territory of a large city (on the example of Vitebsk). *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 93–112.

Введение. В современных условиях материальную основу жизнедеятельности человека составляют **города – пространственно-ограниченные природно-технические системы (ПТС)**, представленные сложным комплексом взаимосвязанных обменом вещества и энергии живых организмов и абиотических элементов (природных и технических), создающих городскую среду жизни человека, отвечающую его биологическим, экономическим, трудовым, социальным и психологическим потребностям. Городская среда с точки зрения условий проживания (или пребывания) населения достаточно адаптирована для удовлетворения человеческих потребностей. Эти адаптации имеют свои следствия, которые проявляются в нарушении естественной природной обстановки и трансформации состояния всех компонентов окружающей среды, нередко негативно отражаясь на условиях проживания населения. Следовательно, весьма важно своевременно определять степень благоприятности окружающей среды, измененной деятельностью человека, или выполнять ее геоэкологическую оценку, предполагающую проведение анализа качества компонентов среды и тех изменений, которые произошли под воздействием техногенных факторов. Она позволяет определить степень остроты геоэкологических ситуаций и масштабов их распространения. При этом, анализируя преследуемые цель и задачи исследований, целесообразно полагать, что они по своей сути должны быть направлены на оценку **геоэкологических условий территории** – комплекса современных природных и техногенно измененных ее особенностей, определяющих условия функционирования экосистем и материально-энергетического обеспечения жизни населения [1].

Вариантов геоэкологических оценок для различных территорий, в том числе городских, существует достаточно много [2–4 и др.]. Ее (оценку) проводят по набору критериев и ряду показателей техногенных воздействий и состояния окружающей среды города, однако проблема заключается в выборе этих критериев. Это обусловлено тем, что многие используемые критерии обладают разным весом и играют различную роль в оценке геоэкологической обстановки в городе. Их наложение, даже с существенными коэффициентами значимости, нередко приводит к неоправданному завышению оценки влияния одного параметра и недоучету влияния другого.

Завершением любого геоэкологического анализа является создание соответствующих карт. Геоэкологическое картографирование – это новое направление в тематической картографии, задачей которого является отражение результатов взаимодействия природы и общества, а также путей оптимизации этого взаимодействия на принципах рационального природопользования. При этом надо заметить, что к настоящему времени в науках о Земле нет единых подходов к геоэкологическим оценкам и их визуализации, до сих пор не разработана концепция картографирования урбанизированных территорий, не определены его объекты, критерии выделения их границ и оценки, методические приемы, унифицированные легенды и макеты карт, инструктивные документы по их содержанию и организации работ. Недостаточно проработанными остаются вопросы количественного описания исследуемых факторов (критериев) и математический аппарат для их обработки. Используемые в картографировании геоинформационные системы (ГИС), несмотря на широкий круг их функциональных возможностей, требуют дополнительной адаптации к особенностям геоэкологических задач и т. д. [2].

Необходимость решения перечисленных задач весьма актуальна для городов Беларуси, в том числе для Витебска – крупнейшего административного и промышленного центра севера республики, располагающего специфической архитектурно-планировочной и функциональной структурой и остающегося при этом типичным представителем индустриальных центров страны.

Цель работы – разработать методику оценки и картографирования геоэкологических условий территории крупного города (на примере г. Витебска) с учетом естественной природной и функциональной дифференциации территории, существующих техногенных нагрузок и состояния природных компонентов.

Материалы и методы исследования. Факторическую основу исследований составили материалы ранее проведенных работ по оценке геологических, геоморфологических и инженерно-геологических условий территории г. Витебска, техногенных воздействий на компоненты окружающей среды, устойчивости и измененности геосистемы города в условиях техногенного загрязнения, а также роли функционально-планировочной организации г. Витебска в формировании его геоэкологической обстановки [5–12]. Основными методами исследований являлись системный анализ, функциональный подход, а также современные методы обработки и представления информации (программный продукт Microsoft Excel 2013, ГИС "Golden Software Surfer 8", QGIS 3.12).

Характеристика объекта исследований. Объектом исследований послужила природно-техническая система г. Витебска, формирование которой происходило, в основном, на новейшем этапе геологической истории Земли в условиях сложной палеогеографической обстановки, определившей внутреннюю неоднородность структуры рассматриваемой ПТС и специфику взаимодействия ее компонентов под влиянием деятельности человека.

Территория города и его окрестностей располагается в пределах Витебской мульды Оршанской впадины. Глубина залегания кристаллического фундамента здесь составляет 1700 м ниже уровня моря. Осадочную толщу слагают породы PR₂, D₂₋₃ и четвертичной системы. Последние сплошным чехлом покрывают территорию города. Мощность Q отложений изменяется от первых десятков до 120 м, составляя в среднем 35 м. В разрезе они представлены ледниками и водно-ледниковыми песчано-глинистыми отложениями днепровского (фрагментарно), сожского и поозерского горизонтов среднего и верхнего плейстоцена, перекрытых современными аллювиальными, болотными, озерно-болотными, делювиально-пролювиальными и техногенными образованиями [5].

В геоморфологическом отношении рассматриваемая территория расположена на стыке двух геоморфологических районов Белорусского Поозерья – Суражской равнины (на севере и западе) и Витебской возвышенности (на юге и востоке). По происхождению и морфологии в пределах города выделяются долинный комплекс р. Западная Двина и ее притоков, краевые ледниковые образования, моренная, флювиогляциальная и озерно-ледниковая равнины, местами осложненные камами, озами, ложбинами стока ледниковых вод, овражными формами, заболоченными понижениями и термокарстовыми западинами. Современный рельеф города в значительной мере изменен различными экзогенными геологическими процессами (ЭГП), имеющими как природное, так и техногенное происхождение. Среди них эрозионные и склоновые процессы, подтопление, суффозия, морозное пучение и др. Их проявление и развитие на территории города неравномерно и происходит с различной степенью активности. Из всего многообразия ЭГП наиболее масштабно проявляют себя подтопление, эрозионные, склоновые и суффозионные процессы. Глубина залегания грунтовых вод изменяется от менее чем 1 до 10 м и глубже, преобладают глубины 3–5 м; пьезометрические уровни устанавливаются на глубинах от 3 до 11 м в зависимости от геолого-геоморфологических условий. Почвенный покров в городе представлен, в основном, дерново-подзолистыми супесчано-суглинистыми и песчаными почвами, встречаются дерново-подзолистые заболоченные, дерновые заболоченные, местами дерново-карбонатные почвы. В поймах рек – пойменно-болотные и торфяно-болотные почвы [6]. Естественный почвенный покров в городе сильно изменен, а на приусадебных участках окультурен. Степень озеленения территории г. Витебска довольно низкая. Зеленые насаждения занимают 10,7 % ее общей площади и распределены крайне неравномерно [7, 8].

Анализ геолого-геоморфологических разрезов позволил обосновать в пределах каждого геоморфологического района по несколько участков, общее число которых составило 12, что отражает многообразие геолого-геоморфологических условий, встречающихся на территории г. Витебска. С учетом масштаба картирования геолого-геоморфологические разрезы были генерализованы и объединены в определенные типы строения литогенной основы. По особенностям строения литогенной основы как совокупности абиотических условий территории города, предопределяющей морфологическую структуру геосистем и многообразие процессов, возникающих при их функционировании, в пределах г. Витебска обосновывается четыре ее типа. К первому типу отнесены участки, где с поверхности залегает поозерская морена; второй тип образуют территории, сложенные поозерским флювиогляциалом; в третий тип входят участки, где разрез открывают поозерские озерно-ледниковые отложения; четвертый тип представлен участками, поверхность которых слагают современные аллювиальные образования [6].

Современный г. Витебск – это сложный комплекс территорий, занятых производственными предприятиями, жилыми районами, общественными центрами, местами отдыха на открытом воздухе, транспортными и инженерными сооружениями. Согласно существующей планировке города в его пределах выделяются следующие функционально-территориальные зоны [9]:

I. Промышленно-селитебные территории с преобладанием жилых микрорайонов и кварталов одноэтажной застройки и предприятий энергетики, станкостроения, фармацевтической, деревообрабатывающей и пищевой промышленности, железнодорожного транспорта. В зону входят селитебные, промышленные, складские и транспортные территории с многочисленными объектами, оказывающими воздействие различной материально-энергетической природы (физические, химические, биологические и др.) на состояние всех компонентов окружающей среды. Превалирующее значение имеют территории промышленных объектов, протянувшиеся практически сплошной полосой по правобережью Западной Двины. Здесь же сосредоточена большая часть железных дорог и крупные автомагистрали.

II. Промышленно-селитебные территории с преобладанием жилых микрорайонов и кварталов многоэтажной застройки и предприятий машиностроения, электротехники, пищевой промышленности, автотранспорта. Зона объединяет преимущественно селитебные территории с многоквартирной жилой и общественной застройкой (более половины всей площади зоны) в сочетании с промышленными и транспортными объектами, оказывающими различные воздействия на состояние отдельных компонентов окружающей среды.

III. Территории преимущественно селитебного и ландшафтно-рекреационного назначения с включениями объектов легкой промышленности и предприятий по производству строительных материалов и пластмассовых изделий, оказывающих различные воздействия на состояние отдельных компонентов окружающей среды.

В настоящее время в г. Витебске сформировался специфический комплекс техногенных воздействий на ПТС города. При этом основной вклад в формирование геэкологической обстановки вносят физическое и химическое загрязнения [10, 11]. В формировании первого основную роль играют искусственные акустическое (шумовое) и температурное поля. Анализ пространственных и частотных характеристик шумовых нагрузок в городе свидетельствует о том, что более 25 % его территории испытывает акустические нагрузки 55–60 дБ (А), а около 1 % территории подвержено шумовой нагрузке с уровнем звукового давления выше 70 дБ (А) [10].

Источниками температурного или теплового загрязнения на территории города непосредственно являются промышленные и коммунальные предприятия, сети тепло- и водоснабжения, другие теплоэнергетические объекты, функционирование которых при относительно равномерном их пространственном размещении приводит к созданию тепловых аномалий не только в пределах приповерхностных участков города, но и в грунтовых толщах. Анализ тепловых полей показал, что территории с устойчивыми во времени положительными средне- и высококонтрастными тепловыми аномалиями (превышение температуры над фоновой 3–8 °С и более), возникновение которых обусловлено функционированием промышленных предприятий, занимают в пределах г. Витебска около 15 % его территории, а тепловыми утечками из подземных коммуникаций – около 25 % территории города [10, 13].

Химическое загрязнение является одним из важнейших факторов в комплексе техногенных воздействий, формирующих геэкологическую обстановку в г. Витебске. Загрязнению подвержено большинство компонентов окружающей среды (атмосферный воздух, почвы, древесная растительность, подземные воды). Установлено, что самые загрязненные участки, или геохимические аномалии с наиболее интенсивным уровнем загрязнения, расположены вблизи источников загрязнения или в зонах их влияния. Исключение составляют отдельные залесенные участки и лесные массивы, расположенные, преимущественно, на периферии города. Основными химическими веществами, загрязняющими городскую среду, выступают формальдегид, этилацетат, соединения азота, сульфаты, хлориды, тяжелые металлы и нефтепродукты, из которых два последних можно отнести к приоритетным [11].

Оценка устойчивости и измененности геосистемы (ГС) города в условиях техногенного химического загрязнения свидетельствует о том, что большая часть (около 70 %) исследуемой территории при преобладании средней степени устойчивости к техногенному загрязнению испытывает существенные изменения в своем состоянии: порядка 60 % ее площади относятся к категории сильноизмененных территорий [7].

Влияние техногенных воздействий на окружающую среду города привело к значительным изменениям не только в состоянии его растительного и животного мира, которое, как показали наши исследования, подвержено существенным флуктуациям и зависит от принадлежности к определенным функционально-территориальным зонам [8], но и в состоянии здоровья населения. Так, проведенный анализ компонентов, формирующих уровень заболеваемости населения города, а также факторов, оказывающих наибольшее влияние на основные классы заболеваний, позволил установить статистически достоверные зависимости заболеваемости взрослого и детского населения города от качественного состояния атмосферного воздуха и питьевой воды по основным группам нозологических заболеваний [12].

Подводя итог характеристики объекта исследований, следует отметить, что сложившаяся экологическая ситуация в г. Витебске не относится к категории критической, но остается до сегодняшнего дня напряженной.

Методика оценки и картографирования геэкологических условий города. На основании применения совокупного геэкологического подхода, базирующегося на рассмотрении города как природно-технической системы, в пределах которой изучаются все ее структурные элементы и взаимосвязи между ними, нами разработан алгоритм оценки и картографирования геэкологических условий города, предусматривающий создание базы данных и последовательного построения комплекта карт, начиная с тех, что отражают природные и техногенные факторы (типы литогенной основы и функциональное зонирование исследуемой территории, карты состояния природных компонентов, проявлений ЭГП), и заканчивая картами геэкологической обстановки в городе, комфортности среды проживания (пребывания) населения, геэкологического потенциала локальных геосистем. Главный результат исследований – создание карты геэкологических условий территории г. Витебска. Построение первых карт, цель которых заключается в выявлении особенностей природных условий, характера техногенных воздействий и состояния природных компонентов, опирается на сложившиеся неоднократно апробированные методики. Для создания геэкологических карт предложены оригинальные подходы, базирующиеся на геосистемном принципе, моделировании и количественных оценках.

Алгоритм оценки и картографирования геоэкологических условий территории города содержит три блока работ и предполагает выполнение определенных этапов (рис. 1).

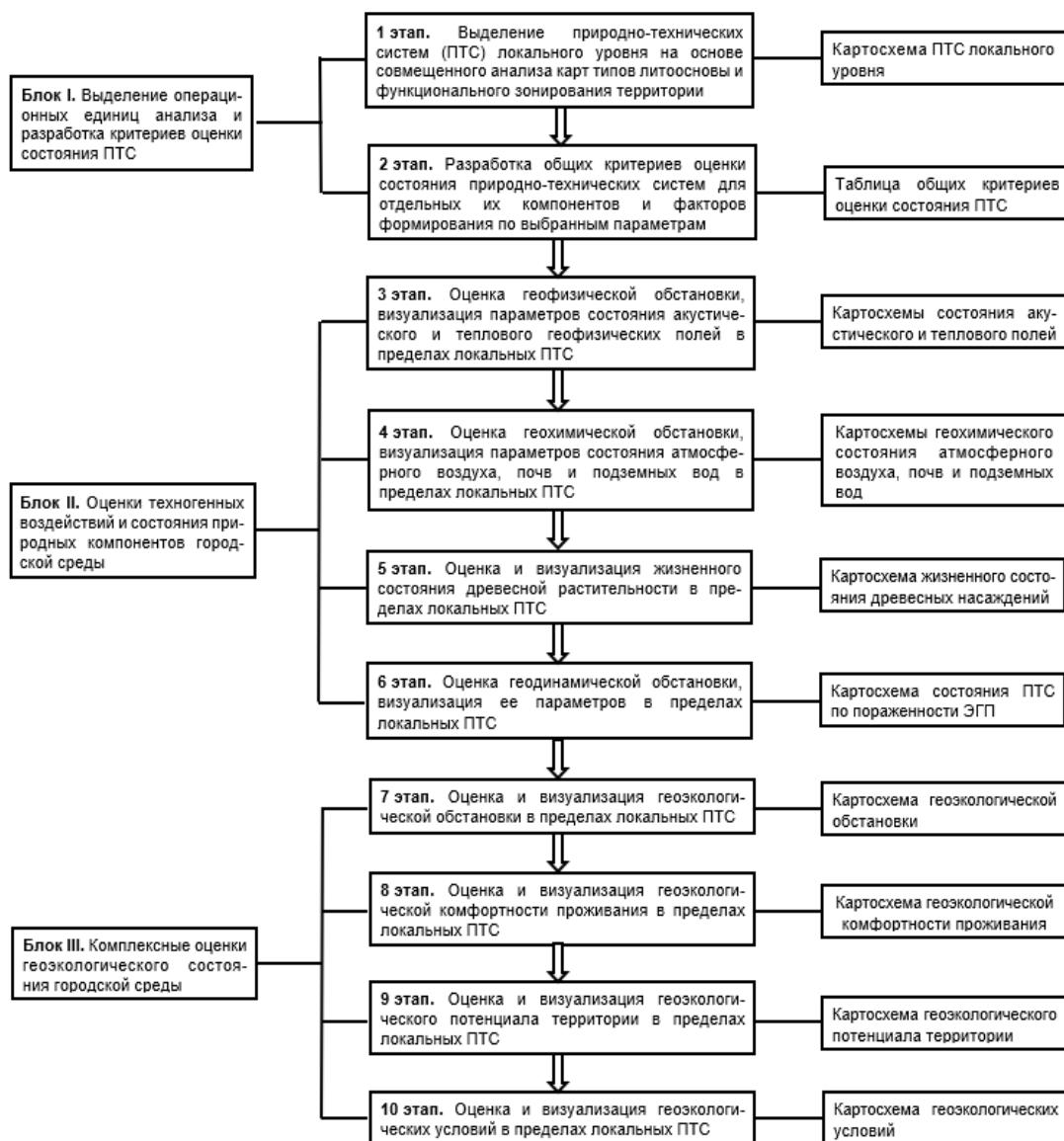


Рис. 1. Алгоритм оценки и картографирования геоэкологических условий города

Fig. 1. Algorithm for assessing and mapping the geoenvironmental conditions of the city

Первый этап – выделение природно-технических систем локального уровня. Для урбанизированной территории объектом геоэкологического картографирования должны являться размещенные в природных комплексах объекты инфраструктуры или природно-технические системы. Поэтому первым шагом в рассматриваемой методике является совместный анализ ранее созданных карт типов литогенной основы и функционального зонирования – первых тематических слоев, создаваемой базы данных (БД). На этом этапе в результате наложения слоев и пересечения площадных объектов создается новый тематический слой в БД – «Локальные ПТС», дифференцирующий территорию города на операционные единицы анализа современного состояния городской среды. Он содержит площадные объекты, атрибутом которых является информация о литогенной основе и функциональной зоне.

Второй этап предусматривает разработку общих критериев оценки состояния природно-технических систем для отдельных их компонентов и факторов формирования по выбранным параметрам, которые также заносятся в БД в виде тематического слоя «Общие критерии состояния ПТС» (табл. 1).

Таблица 1. Параметры и общие критерии оценки состояния городских природно-технических систем**Table 1. Parameters and general criteria for assessing the state of urban natural and technical systems**

Компоненты и факторы формирования ПТС	Параметр изменения или состояния ПТС	Общие критерии оценки состояния ПТС			
		Норма (Н)	Риск (Р)	Кризис (К)	Бедствие (Б)
Акустическое поле	Уровень звука (дБ (А))	<55*	55–60	60–70	>70
Тепловое поле	Превышение температуры (°C) геоповерхности над фоновой	Слабое (<3)	Среднее (3–8)	Высокое (>8)	–
Атмосферный воздух	Уровень загрязнения (по ИЗА)	Низкий (<5)**	Повышенный (5–6)	Высокий (7–13)	Очень высокий (≥14)
Почвенный покров	Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов (по Zc)	Незначительное (<1) и слабое (1–4)***	Среднее (4–16)	Умеренно- опасное (16–32)	Опасное (32–128) и высоко- опасное (>128)
Подземные воды	Степень химического загрязнения	Слабая ****	Средняя	Сильная	Опасная
Древесная растительность	Состояние при комплексном воздействии	Отличное и хорошее	Удовлетворительное	Напряженное	Очень напряженное
ЭГП (эрозия, подтопление, накопление поллютантов)	Площадь поражения при комплексном воздействии (%)	<10*****	10–25	25–50	>50

*В соответствии с ТКП 45-2.04-154-2009 (02250). Защита от шума. Строительные нормы проектирования. Минск : Минстройархитектуры, 2010 ; Алексеев С. В., Кадыскин А. В., Суворов Г. А. Шум и шумовая болезнь. Л. : Медицина, 1972.

**Согласно РД 52.04.667–2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. М., 2006.

***Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель. М. : НИА-Природа, 2013.

****Оценивается на основе данных о содержании химических веществ в подземных водах, загрязненности почв и защищенности подземных вод от загрязнения.

*****Трофимов В. Т., Зилинг Д. Г. Экологическая геология. М. : МГУ, 2002.

Третий этап – оценка геофизической обстановки. На данном этапе осуществляется картографическая визуализация параметров состояния акустического и теплового геофизических полей, получивших на территории города площадное распространение. Использование соответствующих тематических слоев ГИС («Локальные ПТС», «Характеристика геофизических полей») и критериев состояния ПТС в БД позволяют произвести расчет в автоматизированном режиме. Результаты оценки заносятся в отдельный тематический слой «Геофизические поля» (рис. 2, а, б).

Четвертый этап – оценка геохимической обстановки. Данный этап предусматривает оценку распространения и распределения химических веществ в природных компонентах локальных ПТС методами геохимического картографирования, в основе которого лежит представление о том, что техногенные потоки вещества рассеиваются и аккумулируются в указанных компонентах и ими трансформируются. Оценку геохимического состояния компонентов ПТС города отражают на соответствующих схематических картах. Созданные тематические слои ГИС «Локальные ПТС», «Характеристика геохимической обстановки» и критерии состояния ПТС, занесенные в БД, позволяют использовать автоматизированный расчет степени напряженности геохимической обстановки. Результаты оценки заносятся в отдельный тематический слой «Геохимическая обстановка» (рис. 2, в–д).

На пятом этапе оценивается и картографируется жизненное состояние древесных насаждений в пределах локальных природно-технических систем, позволяющее на качественном и полуколичественном уровнях охарактеризовать степень воздействия на природную составляющую ПТС. Эти результаты также заносятся в БД в виде отдельного тематического слоя «Состояние древесной растительности» (рис. 3).

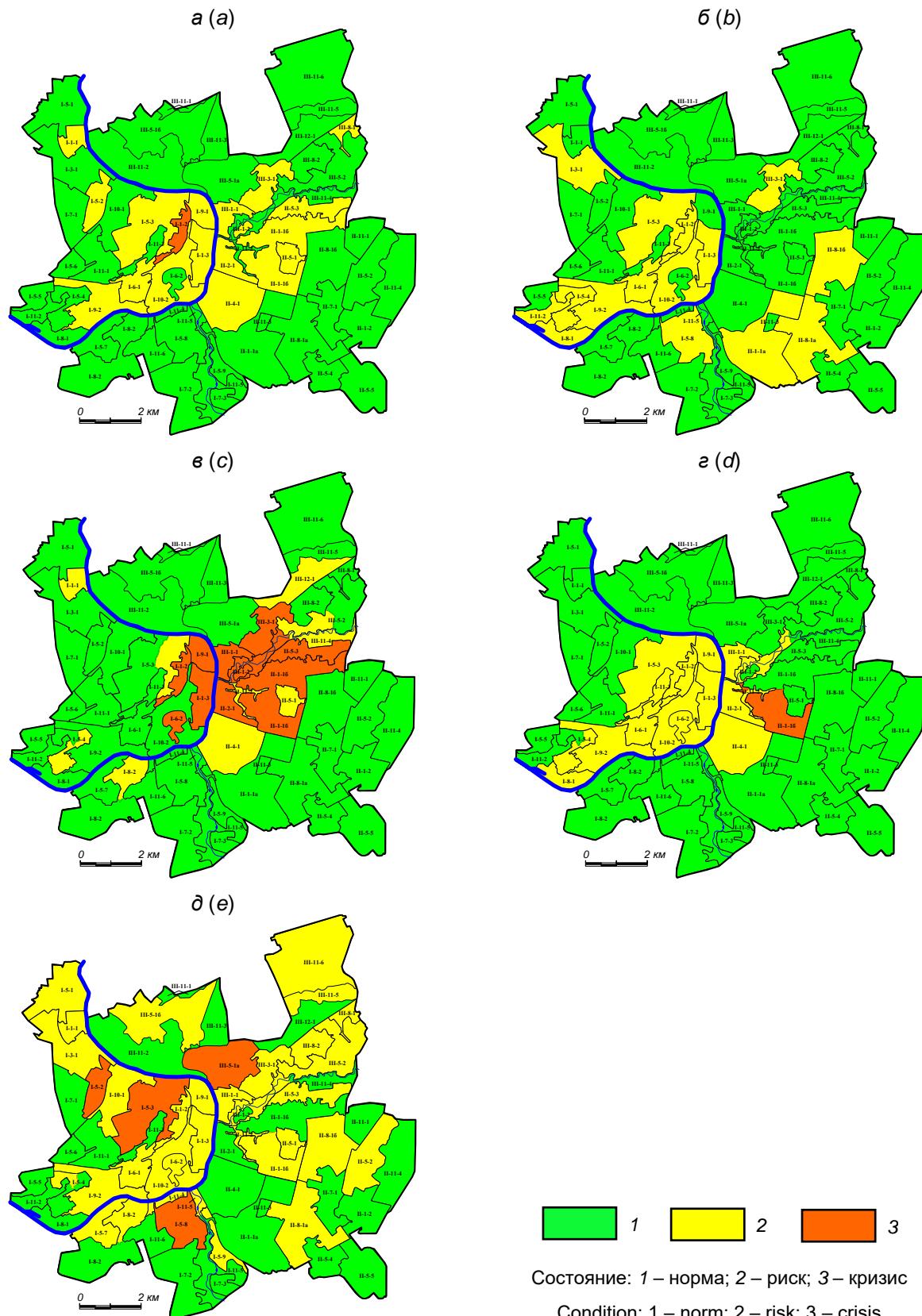


Рис. 2. Картосхемы состояния: а – акустического поля; б – теплового поля; в – атмосферного воздуха; г – почвенного покрова; д – подземных вод в пределах ПТС локального уровня

Fig. 2. Maps of the state: a – acoustic field; b – thermal field; c – atmospheric air; d – soil cover; e – groundwater within the local level of the NTS

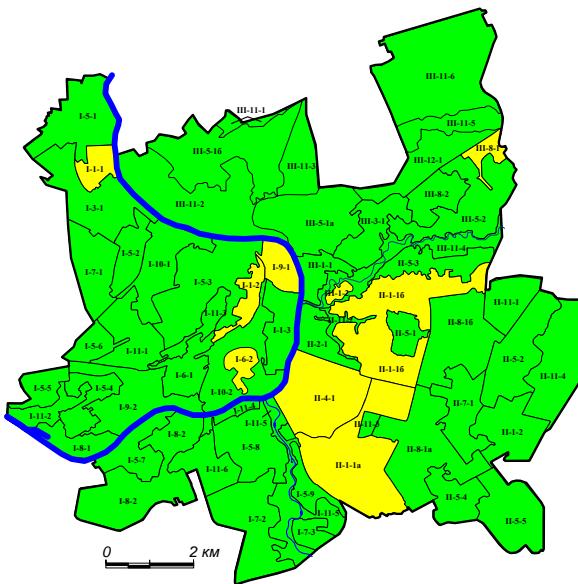


Рис. 3. Картосхема состояния древесных насаждений в пределах ПТС локального уровня.
Условные обозначения те же, что и на рис. 2

Fig. 3. A map of the state of tree plantations within the local level of the NTS.
Symbols are the same as in fig. 2

Шестой этап – предполагает оценку геодинамической обстановки, являющейся одним из важных факторов формирования природно-технических систем, поскольку любые ее изменения способны трансформировать строение, состав и свойства литогенной основы. Характер геодинамической обстановки устанавливают по пораженности территории в каждой выделенной локальной ПТС наиболее значимыми в инженерно-хозяйственном отношении экзогенными процессами. Использование соответствующих тематических слоев ГИС («Локальные ПТС», «Характеристика ЭГП») и разработанных критериев состояния ПТС в БД позволяют рассчитать в автоматизированном режиме соответствующие параметры и создать в ГИС отдельный тематический слой «Геодинамическая обстановка» (рис. 4).

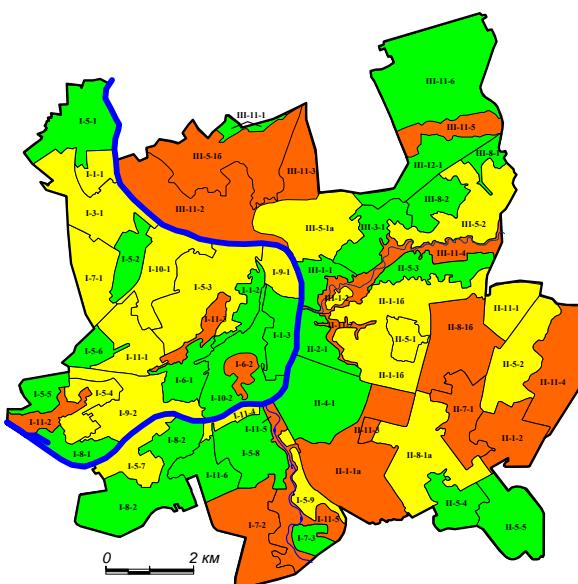


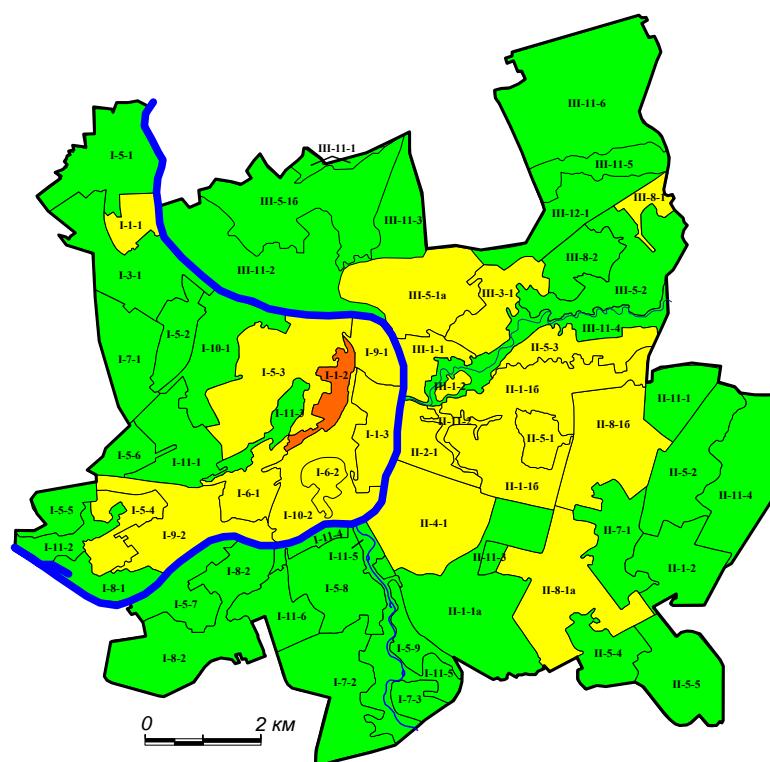
Рис. 4. Картосхема состояния локальных ПТС по пораженности экзогенными процессами (эррозией, подтоплением, в результате накопления поллютантов). Условные обозначения те же, что и на рис. 2

Fig. 4. A map of the state of local NTS in terms of exposure to exogenous processes (erosion, flooding, as a result of the accumulation of pollutants). Symbols are the same as in fig. 2

Седьмой этап – визуализация геоэкологической обстановки – пространственно-временного сочетания средообразующих природно-техногенных условий и экологических проблем, существенно влияющих на жизнь и деятельность населения. На данном этапе проводятся оценка и картографирование геоэкологической ситуации в городе, от которой зависит нормальный ход функционирования локальных природно-технических систем и, как следствие, комфортность проживания населения (рис. 5). Картосхема строится на основе сопоставления результатов рассмотренных выше базовых оценок по каждой выделенной локальной ПТС – отдельные тематические слои в ГИС, с привлечением комплексного показателя геоэкологической ситуации (рис. 5, табл. 2):

$$\Pi_{\Gamma C} = 1/K_1 + 1/K_2 + 1/K_3 + 1/K_4 + 1/K_5 + 1/K_6 + 1/K_7, \quad (1)$$

где K – численное значение критерия состояния одного из компонентов природно-технической системы, равное 1 – норма (Н), 2 – риск (Р), 3 – кризис (К), 4 – бедствие (Б); индексы: 1 – уровень звука, 2 – тепловые аномалии; состояние компонентов геоэкосистемы по отношению к химическому загрязнению: 3 – атмосферного воздуха, 4 – почвенного покрова, 5 – подземных вод, 6 – древесных насаждений; 7 – пораженность территории экзогенными процессами.



Индекс ПТС на карте	Состояние компонентов природно-технической системы							Геоэкологическая обстановка
	Акустическое поле	Тепловое поле	Атмосферный воздух	Почвенный покров	Подземные воды	Древесные насаждения	Экзогенные процессы	
I функционально-территориальная зона								
I-1-1	P	H	P	H	P	P	P	P
I-1-2	K	P	K	P	P	P	H	K
I-1-3	P	P	K	P	P	H	H	P
I-3-1	H	P	H	H	H	H	P	H
I-5-1	H	H	H	H	H	H	H	H
I-5-2	P	H	H	H	K	H	H	H
I-5-3	P	P	H	P	K	H	P	P
I-5-4	H	P	P	P	H	H	P	P

Рис. 5. Картосхема геоэкологической обстановки на территории г. Витебска и фрагмент легенды к ней

Fig. 5. A map of the geoecological situation on the territory of Vitebsk and a fragment of the legend to it

Таблица 2. Оценка качественного состояния геоэкологической обстановки по значению комплексного показателя $\Pi_{ГС}$

Table 2. Assessment of the qualitative state of the geoecological situation by the value of a complex indicator $\Pi_{ГС}$

Качественное состояние геоэкологической обстановки	Значение комплексного показателя геоэкологической ситуации $\Pi_{ГС} (n = 7)$	Качественное состояние геоэкологической обстановки	Значение комплексного показателя геоэкологической ситуации $\Pi_{ГС} (n = 7)$
Норма (Н)	5,51–7,00	Кризис (К)	2,31–3,79
Риск (Р)	3,80–5,50	Бедствие (Б)	1,75–2,30

Данный комплексный показатель представляет собой **нечеткую модель** – математическую модель, в основе вычисления которой лежит нечеткая логика. К построению таких моделей прибегают в том случае, когда предмет исследования имеет весьма слабую формализацию и его точное математическое описание слишком сложное или неизвестно. Качество выходных значений этих моделей (погрешность модели) напрямую зависит только от эксперта, который составляет и настраивает модель [14]. Для минимизации ошибки наилучшим вариантом будет составление максимально полной модели с последующей ее настройкой средствами машинного обучения на обучающей выборке.

В ходе создания модели можно выделить несколько основных этапов: 1) определение входных и выходных параметров модели; 2) формирование базы знаний; 3) выбор одного из методов нечеткого логического вывода. От первого этапа непосредственно будут зависеть два других, поскольку именно он определяет будущее функционирование модели. База знаний (или правил) – это совокупность нечетких правил вида «если..., то...», которые определяют взаимосвязь между входами и выходами исследуемого объекта. Количество правил в системе не ограничено и также устанавливается экспертом. Обобщенный формат нечетких правил такой: если – «условие правила», то – «заключение правила» [15]. Условие правила характеризует текущее состояние объекта, а заключение – то, как это условие повлияет на объект. Общий вид условий и заключений невозможно выделить, поскольку они определяются нечетким логическим выводом [14].

Каждое правило в системе имеет вес. Этот параметр характеризует значимость правила в модели. Весовые коэффициенты присваиваются правилу в диапазоне [0, 1]. Во многих примерах нечетких моделей, которые можно встретить в литературе, данные веса не указаны, но это не означает, что их нет. В действительности для каждого правила из базы в таком случае вес фиксирован и равен 1 [16]. Условия и заключения для каждого правила могут быть двух видов: а) простое – в нем участвует одна нечеткая переменная; б) составное – участвуют несколько нечетких переменных [14].

В зависимости от созданной базы знаний для модели определяется система нечеткого логического вывода. **Нечетким логическим выводом** называется получение заключения в виде нечеткого множества, соответствующего текущим значениям входов, с использованием нечеткой базы знаний и нечетких операций [17].

Легенда карты геоэкологической обстановки представляется в виде матрицы (см. рис. 5). Ее заполнение по всем локальным ПТС итоговыми оценками геоэкологической опасности позволяет установить закономерности их территориальной дифференциации.

Восьмой этап – оценка и картографирование геоэкологической комфортности городской среды. Различные оценки геоэкологической обстановки любой урбанизированной территории актуализируют вопрос о геоэкологической комфортности среды проживания (или пребывания) населения. Под **комфортностью среды** обычно понимают оптимальное для человека состояние окружающей его среды, обеспечивающее здоровье и работоспособность [18].

Использование категории нечеткости позволяет оценить качество среды проживания населения города. Для проведения многофакторной геоэкологической оценки качества городской среды предлагается использовать так называемую функцию желательности Харрингтона – Менчера [19], адаптированную нами для системы показателей, комплексно характеризующих геоэкологическую обстановку исследуемой территории. Данная функция позволяет в какой-то степени моделировать процессы поведения отдельных подсистем внутри системы, учитывать связи и воздействия при оценке качества объекта. Основой ее построения и приоритетной возможностью является преобразование натуральных значений частных параметров различной физической сущности и размерности в единую безразмерную шкалу желательности (предпочтительности) [20]. Назначение шкалы желательности – это установление соответствия между физическими и психологическими параметрами. Здесь под **физическими параметрами** понимаются возможные отклики, характеризующие функционирование исследуемого объекта, а под **психологическими параметрами** понимаются чисто субъективные оценки экспериментатора желательности (предпочтительности) того или иного значения отклика.

Чтобы получить шкалу желательности, удобно пользоваться готовой, разработанной ЮНЕСКО, таблицей соответствий между отношениями предпочтения в эмпирической и числовой системах [20]. Связь между уровнем геоэкологической комфортности и значением комплексного показателя качества городской среды (КП_{КС}) приведена в табл. 3.

Таблица 3. Оценка геоэкологической комфортности по значению комплексного показателя качества городской среды

Table 3. Assessment of geoecological comfort by the value of a complex indicator of the quality of the urban environment

Геоэкологическая комфортность (желательность)	Значение КП _{КС} (по шкале ЮНЕСКО)	Геоэкологическая комфортность (желательность)	Значение КП _{КС} (по шкале ЮНЕСКО)
Очень высокая	0,88–1,00	Низкая	0,37–0,50
Высокая	0,71–0,87	Очень низкая	0,00–0,36
Удовлетворительная	0,51–0,70	–	–

Комплексный показатель качества городской среды на основе обобщенной функции желательности рассчитывают как среднее геометрическое частных показателей d_i ($i = 1–7$), отражающих состояние различных факторов, влияющих на качество городской среды:

$$КП_{КС} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}, \quad (2)$$

где n – число используемых показателей параметров среды; d_i – частный показатель качества состояния компонента среды (акустического поля, теплового поля, атмосферного воздуха, почвенного покрова, подземных вод, древесных насаждений, пораженность территории ЭГП).

Следует заметить, что для частных показателей вполне можно применить одну из категорий нечеткости – нечеткость непосредственных данных, когда любой из этих показателей будет равен отношению $1 / K$, где K – численное значение критерия состояния одного из компонентов геоэкосистемы, равное 1, 2, 3 или 4.

Численная реализация алгоритма расчета показателя качества городской среды была реализована в программе Microsoft Excel 2013. Примеры результатов вычислений представлены в табл. 4. Результаты расчетов и их картографическое представление заносятся в отдельный тематический слой «Геоэкологическая комфортность».

Таблица 4. Примеры результатов оценки геоэкологической комфортности городской среды применительно к локальным природно-техническим системам

Table 4. Examples of the results of assessing the geoecological comfort of the urban environment in relation to local natural and technical systems

Индекс ПТС на карте	Значение комплексного показателя качества городской среды	Геоэкологическая комфортность	Индекс ПТС на карте	Значение комплексного показателя качества городской среды	Геоэкологическая комфортность
<i>I функционально-территориальная зона</i>					
I-1-1	0,610	Удовлетворительная	I-5-2	0,773	Высокая
I-1-2	0,490	Низкая	I-5-3	0,547	Удовлетворительная
I-1-3	0,570	Удовлетворительная	I-5-4	0,685	Удовлетворительная
I-3-1	0,773	Высокая	I-5-5	1,000	Очень высокая
I-5-1	0,935	Очень высокая	–	–	–

Девятый этап – оценка и картографирование геоэкологического потенциала городской среды. Геоэкологические условия любой геосистемы (ГС) будут зависеть не только от изменений состояния и свойств ее компонентов, но и от способности сохранять свою структуру и характер функционирования в пространстве и во времени при изменяющихся условиях, т. е. устойчивости, которая в совокупности со степенью нарушенности (измененности) геосистемы позволяет оценить **геоэкологический потенциал** урбанизированной территории, под которым автором понимается запас потенциальной устойчивости геосистемы в условиях конкретных техногенных нагрузок.

Введение понятия геоэкологического потенциала и его использование при оценке геоэкологических условий территории города требует количественного подхода [21]. Для решения этой задачи необходимо провести количественную (балльную) оценку параметров устойчивости и степени нарушенности ГС. Соотношение этих двух параметров позволяет ввести *коэффициент состояния геосистемы*

$$(К_{СГ}) : К_{СГ} = У / Н, \quad (3)$$

где У – потенциальная устойчивость геосистемы к техногенному воздействию (в нашем случае – к химическому загрязнению); Н – степень нарушенности ГС. При $К_{СГ} = 1$ геосистема будет находиться в состоянии динамического равновесия, когда техногенная нагрузка на ее компоненты компенсируется природной способностью к саморегуляции при условии отсутствия увеличения нагрузки [21].

Представляется необходимым выполнить дальнейшую разбраковку геосистемы относительно описанной группы, используя для этого *коэффициент геоэкологического потенциала*, под которым понимают количественную характеристику резерва потенциальной устойчивости геосистемы в условиях существующих нагрузок [21]. Если состояние ГС рассмотренной группы принять за базовое, то можно определить коэффициент геоэкологического потенциала ($К_{ГП}$). Данный показатель представляет собой разность коэффициента состояния анализируемой ГС и геосистемы с $К_{СГ} = 1$:

$$К_{ГП} = К_{СГ} - 1, \quad (4)$$

где $К_{СГ}$ – коэффициент состояния геосистемы. Такая операция позволяет провести группировку изучаемых геосистем по признаку комплекса деструктивных процессов, протекающих в них, которые в своей сущности способны определять геоэкологические ограничения в пределах ГС:

$$-0,5 < К_{ГП} < 0, \quad К_{ГП} = 0, \quad 0 < К_{ГП} \leq 1,0. \quad (5)$$

Вполне очевидно, что отрицательное значение $К_{ГП}$ указывает на развитие деструктивных процессов в геосистеме, способных привести к негативным изменениям ее компонентов. Для такой ГС будут характерны, к примеру, истощение, а может, и полная замена почвенного покрова слоем техногенных грунтов и т. п. Положительные же значения $К_{ГП}$ свидетельствуют об отсутствии или весьма слабых проявлениях деструктивных процессов изменений компонентов геосистемы, не нарушающих ее потенциал устойчивости.

Этот этап реализуется в ГИС на основании соответствующих тематических слоев (локальные ПТС, устойчивости и измененности геосистемы) с привлечением коэффициента геоэкологического потенциала каждой ПТС локального уровня (табл. 5). Полученные результаты заносятся в отдельный тематический слой «Геоэкологический потенциал».

Таблица 5. Примеры результатов оценки геоэкологического потенциала территории города применительно к локальным природно-техногенным системам

Table 5. Examples of the results of assessing the geoecological potential of the city territory in relation to local natural and man-made systems

Индекс ПТС на карте	Показатель		Коэффициент	
	потенциальной устойчивости (У)	степени нарушенности (Н)	состояния ПТГЭС ($К_{СГ} = У / Н$)	геоэкологического потенциала ($К_{ГП} = К_{СГ} - 1$)
<i>I функционально-территориальная зона</i>				
I-1-1	2,00	2,82	0,71	-0,29
I-1-2	2,00	3,00	0,67	-0,33
I-1-3	2,10	2,95	0,71	-0,29
I-3-1	2,00	2,10	0,95	-0,05
I-5-1	2,00	2,05	0,98	-0,02
I-5-2	2,00	2,98	0,67	-0,33
I-5-3	1,80	2,96	0,61	-0,39
I-5-4	1,90	2,80	0,68	-0,32
I-5-5	2,20	2,20	1,00	0,00

Десятый этап – заключительный. На этом этапе на основе совмещения полученных тематических слоев, отражающих геоэкологическую обстановку, комфортность среды и геоэкологический потенциал, проводятся оценка и картографирование геоэкологических условий территории города. В результате формируется новый тематический слой и создается итоговая схематическая карта «Геоэкологические условия территории г. Витебска» (рис. 6).

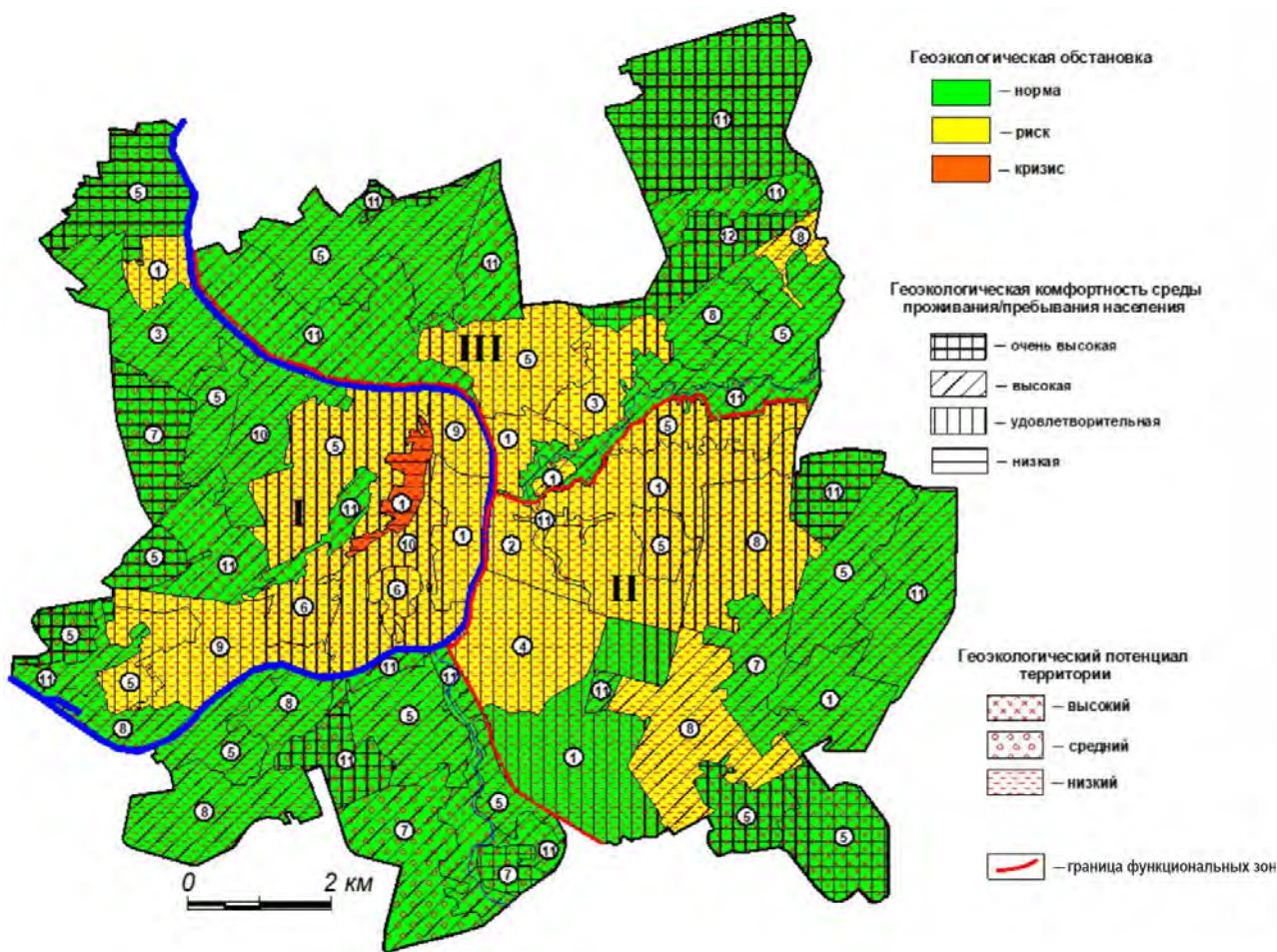


Рис. 6. Схематическая карта геокологических условий территории г. Витебска.

Функциональные зоны: I – промышленно-селитебные территории с преобладанием жилых микрорайонов и кварталов одноэтажной застройки и предприятий энергетики, станкостроения, фармацевтической,

деревообрабатывающей и пищевой промышленности, железнодорожного транспорта; II – промышленно-селитебные территории с преобладанием жилых микрорайонов и кварталов многоэтажной застройки и предприятий машиностроения электротехники, пищевой промышленности, автотранспорта; III – территории преимущественно селитебного и ландшафтно-рекреационного назначения с включениями объектов легкой промышленности и предприятий по производству строительных материалов и пластмассовых изделий.

Тип застройки: 1 – многоквартирная жилая и общественная; 2 – многоквартирная жилая и общественная с озелененными территориями; 3 – многоквартирная жилая и общественная с промышленной застройкой;

4 – многоквартирная жилая и общественная в сочетании с усадебной; 5 – жилая усадебная и дачная; 6 – жилая усадебная в сочетании с многоквартирной и общественной; 7 – жилая усадебная и дачная с озелененными территориями; 8 – промышленная и коммунально-складская; 9 – промышленная и коммунально-складская в сочетании с жилой; 10 – промышленная и коммунально-складская с озелененными территориями; 11 – территории нехозяйственного назначения (лесопарки, парки, лесные и заболоченные массивы, пустыри и другие экосистемы); 12 – озелененные территории с промышленной застройкой

Fig. 6. Schematic map of the geoecological conditions of the territory of Vitebsk.

Functional zones: I – industrial-settlement territories with predominance of inhabited microdistricts and quarters of one-storey building and enterprises of power engineering, machine-tool building, pharmaceutical, de-machining and food industry, railway transport; II – industrially-residential areas with a prevalence of residential microdistricts and blocks of multi-storey building and enterprises of mechanical engineering, electrical engineering, food industry, motor transport; III – areas of mainly residential and landscape-recreational purposes with inclusions of objects of timber industry and enterprises of building materials and plastic products.

Type of building: 1 – apartment inhabited and public; 2 – apartment inhabited and public with planted territories;

3 – apartment inhabited and public with industrial building; 4 – apartment inhabited and public in combination with homestead; 5 – inhabited homestead and summer residences; 6 – residential homestead in combination with multi-apartment and public; 7 – residential homestead and cottage in combination with green areas; 8 – industrial and municipal warehouses; 9 – industrial and municipal warehouses in combination with residential; 10 – industrial and municipal warehouses with green areas; 11 – non-economic territories (forest parks, parks, wooded and marshy areas, wasteland and other ecosystems); 12 – landscaped areas with industrial buildings

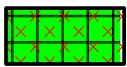
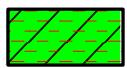
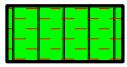
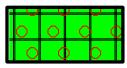
Легенда к схематической карте геоэкологических условий территории Витебска

Legend to the schematic map of geoecological conditions of the territory of Vitebsk

Геоэкологические условия	Обозначение	Геоэкологические ограничения		Вероятный риск заболеваемости населения*
		природные	техногенные	
I функционально-территориальная зона				
Весьма благоприятные		Без ограничений		Фоновый уровень заболеваемости населения, связанный с ингаляционным и пероральным воздействием неканцерогена, дискомфорт в единичных случаях у особо чувствительных людей
		Наличие локальных небольших понижений рельефа – потенциальных участков аккумуляции поллютантов	–	
Благоприятные		Локальное распространение спорадических вод в верхних горизонтах моренных толщ, приуроченных к песчаным прослойям и линзам; возможно развитие процессов подтопления	Незначительное локальное загрязнение подземных вод	Незначительное локальное загрязнение почвенного покрова
		Наличие локальных небольших понижений рельефа. Слабое развитие процессов подтопления, заболачивания и эрозионных процессов	Незначительное локальное загрязнение почвенного покрова	
		Наличие локальных мелкоплощадных понижений рельефа		
Относительно благоприятные		Наличие локальных мелко- и среднеплощадных понижений рельефа, участков развития эрозионных процессов и зон подтопления	Незначительные акустические нагрузки и положительные среднеконтрастные тепловые аномалии геоповерхности, локальные загрязнения почвенного покрова и подземных вод	Возможны различные дискомфортные состояния, фоновый уровень заболеваемости
Относительно неблагоприятные		Высокое положение уровня грунтовых вод; наличие крупноплощадных понижений рельефа и участков развития зон подтопления	Повышенная акустическая нагрузка; широкое развитие положительных средне- и высококонтрастных тепловых аномалий геоповерхности. Высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха; значительные загрязнения почвенного покрова и подземных вод, локально – древесных насаждений	Систематические жалобы населения на различные дискомфортные состояния, обнаруживается тенденция к росту общей заболеваемости
Неблагоприятные		Высокое положение уровня грунтовых вод; наличие крупноплощадных понижений рельефа и участков развития зон подтопления	Большая акустическая нагрузка. Высокая степень формирования положительных среднеконтрастных тепловых аномалий геоповерхности; высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха, почвенного покрова, подземных вод и древесных насаждений	Возможны массовые жалобы населения на различные дискомфортные состояния, достоверный рост заболеваемости, развитие специфичной типу воздействия патологии

*Устанавливается по экспресс-оценке и прогнозированию риска влияния на здоровье населения шума, а также основных химических веществ при ингаляционном и пероральном поступлении [22].

Продолжение легенды к рис. 6
Continuation of the legend to Fig. 6

Геоэкологические условия	Обозначение	Геоэкологические ограничения		Вероятный риск заболеваемости населения*
		природные	техногенные	
II функционально-территориальная зона				
Весьма благоприятные		Наличие локальных небольших понижений рельефа	—	Фоновый уровень заболеваемости населения, связанный с ингаляционным и пероральным воздействием неканцерогена, дискомфорт в единичных случаях у особо чувствительных людей
Относительно благоприятные		Наличие локальных среднеплощадных понижений рельефа, участков подтопления и заболачивания	Локальное загрязнение почвенного покрова и подземных вод	Возможны различные дискомфортные состояния, фоновый уровень заболеваемости
		Наличие средне- и крупноплощадных понижений рельефа, зон подтопления, участков локального развития эрозионных процессов	Незначительные акустические нагрузки, локальные положительные средне- и высококонтрастные тепловые аномалии геоповерхности; ограниченное загрязнение почвенного покрова и подземных вод	
Относительно неблагоприятные		Наличие мелко- и среднеплощадных участков аккумуляции поллютантов, частое развитие эрозионных, склоновых и суффозионных процессов	Локальное загрязнение атмосферного воздуха, почвенного покрова и подземных вод	Систематические жалобы населения на различные дискомфортные состояния, обнаруживается тенденция к росту общей заболеваемости
		Локальное распространение значительных по мощности толщ техногенных отложений, наличие крупноплощадных понижений рельефа и участков развития зон подтопления, проявление морозного пучения	Повышенная акустическая нагрузка. Локальное развитие положительных средне- и высококонтрастных тепловых аномалий геоповерхности. Высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха; значительные загрязнения почвенного покрова, подземных вод и древесных насаждений	
III функционально-территориальная зона				
Весьма благоприятные		Развитие верховодки на глубинах 0,5–2,0 м, распространение спорадических вод в верхних горизонтах озерно-ледниковых толщ; наличие локальных небольших понижений рельефа, озерных котловин, частое проявление морозного пучения	Локальное среднего уровня загрязнение атмосферного воздуха	Фоновый уровень заболеваемости населения, связанный с ингаляционным и пероральным воздействием неканцерогена, дискомфорт в единичных случаях у особо чувствительных людей

*Продолжение легенды к рис. 6**Ending of the legend to Fig. 6*

Геоэкологические условия	Обозначение	Геоэкологические ограничения		Вероятный риск заболеваемости населения*
		природные	техногенные	
Благоприятные		Ограниченоное распространение спорадических вод в верхних горизонтах моренных толщ; наличие средне- и крупно-площадных понижений рельефа, озерных котловин	Незначительное загрязнение подземных вод	Фоновый уровень заболеваемости населения, связанный с ингаляционным и пероральным воздействием неканцерогена, дискомфорт в единичных случаях у особо чувствительных людей
		Наличие мелко- и среднеплощадных участков аккумуляции поллютантов. Локальное развитие зон подтопления, эрозионных, склоновых и суффозионных процессов	Локальное незначительное, в отдельных случаях выше среднего уровня загрязнение атмосферного воздуха, подземных вод и древесных насаждений	
		Наличие средне- и крупноплощадных понижений рельефа, озерных котловин. Слабое развитие эрозионных процессов и подтопления	Незначительное локальное загрязнение почвенного покрова	
Относительно благоприятные		Наличие средне- и крупноплощадных понижений рельефа, озерных котловин, участков локального развития зон подтопления и эрозионных процессов	Мелкоплощадное развитие положительных среднеконтрастных тепловых аномалий геоповерхности; локальное выше среднего уровня загрязнение атмосферного воздуха и подземных вод	Возможны различные дискомфортные состояния, фоновый уровень заболеваемости
		Наличие небольших по площади понижений рельефа, зон подтопления, участков локального развития эрозионных процессов	Мелкоплощадное развитие положительных среднеконтрастных тепловых аномалий геоповерхности; локальное выше среднего уровня загрязнение атмосферного воздуха и подземных вод	
Относительно неблагоприятные		Развитие спорадических вод в верхних горизонтах озерно-ледниковых толщ, зон подтопления, наличие локальных небольших понижений рельефа, частое проявление морозного пучения	Повышенная акустическая нагрузка; локальное выше среднего уровня загрязнение подземных вод и древесных насаждений	Наблюдаются систематические жалобы населения на различные дискомфортные состояния, обнаруживается тенденция к росту общей заболеваемости
		Наличие крупноплощадных понижений рельефа и участков развития зон подтопления	Повышенная акустическая нагрузка. Частое развитие положительных средне- и высококонтрастных тепловых аномалий геоповерхности. Высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха; значительные загрязнения почвенного покрова, подземных вод и древесных насаждений	

Напомним, что под **геоэкологическими условиями урбанизированных территорий** понимают комплекс современных природных и техногенно измененных свойств городской среды, которые определяют условия функционирования экосистем, в том числе проживания населения. Их можно классифицировать по возрастанию степени (или уровня) геоэкологической благоприятности. В основу выделения этих уровней положено ранжирование состояний природно-технических систем по наиболее репрезентативным показателям с обязательным использованием и взаимным учетом тематических, пространственных и динамических критериев их оценки [23]. Применительно к исследуемой нами территории установлены следующие классы геоэкологических условий: **неблагоприятные, относительно неблагоприятные, относительно благоприятные, благоприятные и весьма благоприятные** (см. рис. 6). Следует заметить, что каждый из этих классов характеризуется не только набором основных критериев оценки геоэкологических условий (геоэкологическая обстановка, комфортность среды и геоэкологический потенциал), но и **геоэкологическими ограничениями**, под которыми нами понимаются группы природно-техногенных факторов, выводящие природно-технические системы из устойчивого (стабильного) состояния вследствие качественно-количественных изменений свойств их литогенной основы, геофизических параметров среды, химического состава депонирующих компонентов и т. д., иными словами, являющиеся ограничениями для проживания населения и хозяйственного освоения урбанизированной территории, а также потенциальным риском влияния на здоровье населения факторов среды обитания – вероятности возникновения неблагоприятных последствий для организма человека при заданных условиях места и времени.

Геоэкологические ограничения в пределах локальных ПТС устанавливаются на основе анализа информации, содержащейся в тематических слоях «Литогенная основа», «Характеристика геофизических полей», «Характеристика геохимической обстановки», «Характеристика ЭГП», а также «Состояние древесной растительности». Уровни вероятного риска заболеваемости населения определяются в отношении основных загрязняющих веществ атмосферного воздуха и шумовых нагрузок по специальным номограммам [22].

Выводы.

1. Предложен алгоритм комплексной оценки геоэкологических условий городской территории, включающий интегральное использование результатов исследований геоэкологической обстановки, комфортности среды проживания (пребывания) населения и геоэкологического потенциала территорий локальных природно-технических систем, с выделением различных классов условий, геоэкологических ограничений для жизнедеятельности и риска заболеваемости населения.

2. Разработана методика оценки и картографирования геоэкологической обстановки в городе, основанная на совокупном анализе результатов оценок геофизической, геохимической и геодинамической опасностей в пределах природно-технических систем локального уровня, а также анализе жизненного состояния древесных насаждений как индикаторов состояния окружающей среды с привлечением комплексного показателя геоэкологической ситуации, представляющего собой математическую модель, в основе вычисления которой лежит нечеткая логика.

3. Для оценки геоэкологической обстановки на территории г. Витебска создана серия геоэкологических тематических карт на основе ГИС-технологий, отражающих состояние: наиболее значимых природных компонентов – атмосферного воздуха, почвенного покрова, подземных вод, древесных насаждений; и факторов формирования городской среды – акустического и теплового режимов территории, ее пораженности экзогенными процессами.

4. Разработана методика оценки геоэкологической комфортности проживания (пребывания) населения г. Витебска, основанная на применении комплексного показателя качества городской среды, рассчитанного с использованием теории нечетких множеств, и методика оценки геоэкологического потенциала территории, в основу которой положено соотношение параметров устойчивости и степени нарушенности геосистемы города.

5. Пространственный анализ геоэкологических условий территории г. Витебска показал, что наибольшим их разнообразием обладает I функционально-территориальная зона, занимающая северо-западную, западную и юго-западную части города, и включающая промышленно-силовые территории с преобладанием многоэтажной и усадебной застройки, предприятий энергетики, станкостроения, фармацевтической, деревообрабатывающей, пищевой промышленности и железнодорожного транспорта. В целом по г. Витебску порядка 76 % его площади занимают территории локальных природно-технических систем с относительно благоприятными (около 52 %), благоприятными (16 %) и весьма благоприятными (8 %) геоэкологическими условиями; относительно неблагоприятные условия отмечаются на 23 % площади города, менее 1 % занимают территории локальных ПТС с неблагоприятными геоэкологическими условиями.

6. Разработанный научно-методический комплекс картографирования геоэкологических условий территории крупного города, реализованный на примере г. Витебска, может быть использован при изучении, оценке и картографировании экологических ситуаций в других крупных городах Беларуси и зарубежных стран.

Список использованных источников

1. Григорьева, И. Ю. Геоэкологические условия как базовая категория нормативной документации по инженерно-экологическим изысканиям [Электронный ресурс] / И. Ю. Григорьева // ГеоИнфо : электронный журнал. – 2018. – № 22. – Режим доступа: <https://geoinfo.ru>. – Дата доступа: 28.11.2022.
2. Заиканов, В. Г. Подходы к геоэкологическому картографированию урбанизированной территории / В. Г. Заиканов, Т. Б. Минакова, М. А. Патренков // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2010. – № 6. – С. 336–350.
3. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 301 с.
4. Трофимчук, Д. А. Геоэкологическая оценка урбанизированных ландшафтов города Бреста / Д. А. Трофимчук // Земля Беларуси. – 2016. – № 4. – С. 34–36.
5. Красовская, И. А. Результаты комплексных инженерно-геологических исследований территории Витебска и его окрестностей [Электронный ресурс] / И. А. Красовская, А. Н. Галкин, П. А. Галкин // Ученые записки Витебского государственного университета имени П. М. Машерова. – 2009. – Т. 8. – С. 299–314. – Режим доступа: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/5131>. – Дата доступа: 05.12.2022.
6. Инженерно-геологическое районирование и типы геологической среды территории Витебска / П. А. Галкин [и др.] // Літасфера. – 2020. – № 2 (53). – С. 129–140.
7. Оценка устойчивости и измененности природно-технической геосистемы Витебска в условиях техногенного загрязнения / П. А. Галкин [и др.] // Літасфера. – 2021. – № 2 (55). – С. 125–140.
8. Галкин, П. А. Современное состояние древесной растительности на территории Витебска / П. А. Галкин, И. А. Литвенкова, К. С. Космачева // Географические аспекты устойчивого развития регионов : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 27–29 мая 2021 г. / Гом. гос. ун-т ; редкол. : А. И. Павловский (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 93–96.
9. Галкин, П. А. Функционально-планировочная организация Витебска и ее роль в оценке геоэкологической обстановки города / П. А. Галкин, И. А. Красовская, А. Н. Галкин // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2020. – № 2. – С. 60–68.
10. Особенности техногенных воздействий на геоэкологическую обстановку Витебска (Часть 1. Физическое и биологическое воздействие) / П. А. Галкин [и др.] // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2021. – № 1. – С. 77–85.
11. Особенности техногенных воздействий на геоэкологическую обстановку Витебска (Часть 2. Химическое воздействие) / П. А. Галкин [и др.] // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2021. – № 2. – С. 60–69.
12. Галкин, П. А. Состояние здоровья населения Витебска [Электронный ресурс] / П. А. Галкин, А. Д. Зубов // Молодость. Интеллект. Инициатива : матер. X Междунар. науч.-практ. конф. студ. и магистрантов, Витебск, 22 апр. 2022 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П. М. Машерова, 2022. – С. 36–38. – Режим доступа: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/32669>. – Дата доступа: 05.12.2022.
13. Кравчук, Л. А. Средоформирующие функции зеленой инфраструктуры города Витебска / Л. А. Кравчук, Н. М. Баженова, А. Н. Гайшун // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 127–137.
14. Нечеткие системы. Справочник по языку программирования MQL5 для клиентского терминала MetaTrader 5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mql5.com/ru/docs/standardlibrary/mathematics/fuzzy_logic/fuzzy_system. – Дата доступа: 15.05.2022.
15. Рыбанов, А. А. Методы анализа нечеткой информации : курс лекций [Электронный ресурс] / А. А. Рыбанов, М. В. Фадеева. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru:57772/csp/lib/PDF/612280797.pdf>. – Дата доступа: 28.05.2022.
16. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский ; пер. с пол. И. Д. Рудинского. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 343 с.
17. Григорьева, Д. Р. Основы нечеткой логики / Д. Р. Григорьева, Г. А. Гареева, Р. Р. Басыров. – Набережные Челны : Изд-во НЧИ КФУ, 2018. – 42 с.
18. Боголюбов, В. С. Актуальные проблемы крупных городов / В. С. Боголюбов. – СПб. : СПбГИЭА, 1997. – 194 с.
19. Долгов, Ю. А. Статистическое моделирование / Ю. А. Долгов. – Тирасполь : Изд-во Приднестр. ун-та, 2011. – 346 с.
20. Многофакторная модель как основа для управления качеством окружающей среды урбанизированных территорий / Е. В. Сокольская [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 2. – С. 26–34.
21. Рубан, Н. В. Принципы оценки экологического потенциала ландшафтов для целей геоэкологического районирования / Н. В. Рубан // Известия УГТУ. – 2004. – Вып. 19. – С. 188–192.
22. Экспресс-оценка и прогнозирование риска влияния на здоровье населения шума, основных химических веществ при ингаляционном и пероральном поступлении : инструкция по применению : утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 05.01.07 / Учреждение-разработчик: ГУ «Республиканский научно-практический центр гигиены» ; авторы: С. М. Соколов, В. П. Филонов, Т. Е. Науменко, Т. Д. Гриценко, А. Е. Пшегрода, Л. Н. Смирнов. – Минск : Респ. науч.-практ. центр гигиены, 2007. – 31 с.
23. Снакин, В. В. Экология и охрана природы : словарь-справочник / В. В. Снакин ; под ред. А. Л. Яншина. – М. : Academia, 2000. – 384 с.

References

1. Grigor'eva I. Yu. *Geoekologicheskiye usloviya kak bazovaya kategoriya normativnoy dokumentatsii po inzhenerno-ekologicheskim izyskaniyam* [Geoecological conditions as a basic category of normative documentation for engineering and environmental surveys] [Electronic resource]. Geoinfo. Elektronnyy zhurnal = Geoinfo. Electronic journal, 2018, no. 22. Available at: <https://geoinfo.ru> (accessed 28 November 2022). (in Russian)
2. Zaikanov V. G., Minakova T. B., Patrenkov M. A. *Podkhody k geoekologicheskemu kartografirovaniyu urbanizirovannoy territorii* [Approaches to geoecological mapping of urban areas]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2010, no. 6, pp. 336–350. (in Russian)
3. Khomich V. S. [et al.]. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskiye aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013, 301 p. (in Russian)
4. Trofimchuk, D. A. *Geoekologicheskaya otsenka urbanizirovannykh landshaftov goroda Bresta* [Geoecological assessment of urbanized landscapes of the city of Brest]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2016, no. 4, pp. 34–36. (in Russian)
5. Krasovskaya I. A., Galkin A. N., Galkin P. A. *Rezul'taty kompleksnykh inzhenerno-geologicheskikh issledovanii territorii Vitebska i yego okrestnostey* [The results of complex engineering-geological studies of the territory of Vitebsk and its environs] [Electronic resource]. Uchenyye zapiski Vitebskogo gosudarstvennogo universiteta imeni P. M. Masherova. = Scientific notes of P. M. Masherov VSU, 2009, vol. 8, pp. 299–314. Available at: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/5131> (accessed 5 December 2022) (in Russian)
6. Galkin P. A., Galkin A. N., Pavlovskiy A. I., Shershnev O. V., Molyarenko V. L. *Inzhenerno-geologicheskoye rayonirovaniye i tipy geologicheskoy sredy territorii Vitebska* [Engineering-geological zoning and types of the geological environment of the territory of Vitebsk]. *Litasfera = Lithosphere*, 2020, no. 2 (53), pp. 129–140. (in Russian)
7. Galkin P. A., Torbenko A. B., Krasovskaya I. A., Galkin A. N. *Otsenka ustoychivosti i izmenennosti prirodno-tehnicheskoy geosistemy Vitebska v usloviyah tekhnogenного загрязнения* [Assessment of the stability and change of the natural and technical geosystem of Vitebsk under the conditions of technogenic pollution]. *Litasfera = Lithosphere*, 2021, no. 2 (55), pp. 125–140. (in Russian)
8. Galkin P. A., Litvenkova I. A., Kosmacheva K. S. *Sovremennoye sostoyaniye drevesnoy ras-titel'nosti na territorii Vitebska* [The current state of woody vegetation on the territory of Vitebsk]. *Sb. materialov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Geograficheskiye aspekty ustoychivogo razvitiya regionov"* [Proc. IV Int. sci.-pract. conf. "Geographical aspects of sustainable development of regions"]. Gomel, 2021, pp. 93–96. (in Russian)
9. Galkin P. A., Krasovskaya I. A., Galkin A. N. *Funktional'no-planirovochnaya organizatsiya Vitebska i yeye rol' v otsenke geoekologicheskoy obstanovki goroda* [Functional planning organization of Vitebsk and its role in assessing the geoecological situation of the city]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Ser. 5, Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab Zyamli = Bulletin of Brest University. Ser. 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2020, no. 2, pp. 60–68. (in Russian)
10. Galkin P. A., Cherkasova O. A., Masalkova Yu. Yu., Krasovskaya I. A., Galkin A. N. *Osobennosti tekhnogennykh vozdeystviy na geoekologicheskuyu obstanovku Vitebska (Chast' 1. Fizicheskoye i biologicheskoye vozdeystviya)* [Features of technogenic impacts on the geoecological situation of Vitebsk (Part 1. Physical and biological impacts)]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Ser. 5. Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab Zyamli = Bulletin of Brest University. Ser. 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2021, no. 1, pp. 77–85. (in Russian)
11. Galkin P. A., Cherkasova O. A., Masalkova Yu. Yu., Krasovskaya I. A., Galkin A. N. *Osobennosti tekhnogennykh vozdeystviy na geoekologicheskuyu obstanovku Vitebska (Chast' 2. Khimicheskoye vozdeystviye)* [Features of technogenic impacts on the geoecological situation of Vitebsk (Part 2. Chemical exposure)]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Ser. 5, Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab Zyamli = Bulletin of Brest University. Ser. 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2021, no. 2, pp. 60–69. (in Russian)
12. Galkin P. A., Zubov A. D. *Sostoyaniye zdorov'ya naseleniya Vitebska* [The state of health of the population of Vitebsk] [Electronic resource]. Mater. X mezdunar. nauch.-prakt. konf. stud. i magistrantov "Molodost'. Intellekt. Initiativa" [Proc. X Int. sci.-pract. conf. students and undergraduates "Youth. Intelligence. Initiative"]. Vitebsk, 2022, pp. 36–38. Available at: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/32669> (accessed 5 December 2022) (in Russian)
13. Kravchuk L. A., Bazhenova N. M., Gayshun A. N. *Sredoformiruyushchiye funktsii zelenoy infrastruktury goroda Vitebska* [Environment-forming functions of the green infrastructure of the city of Vitebsk]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2021, no 1, pp. 127–137. (in Russian)
14. Nechetkiye sistemy. Spravochnik po yazyku programmirovaniya MQL5 dlya klyentskogo terminala MetaTrader 5 [Fuzzy systems. Reference on the MQL5 programming language for the MetaTrader 5 client terminal] [Electronic resource]. Available at: https://www.mql5.com/ru/docs/standardlibrary/mathematics/fuzzy_logic/fuzzy_system (accessed 15 May 2022).
15. Rybanov A. A., Fadeyeva M. V. *Metody analiza nechetkoy informatsii. Kurs lektsiy* [Methods for analyzing fuzzy information. Course of lectures] [Electronic resource]. 2019. Available at: <http://lib.volpi.ru:57772/csp/lib/PDF/612280797.pdf> (accessed 28 May 2022). (in Russian)
16. Osovskiy S. *Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004, 343 p. (in Russian)
17. Grigor'eva D. R., Gareeva G. A., Basyrov R. R. *Osnovy nechetkoy logiki* [Fundamentals of fuzzy logic]. Translation from Polish I. D. Rudinskiy. Naberezhnye Chelny, 2018, 42 p. (in Russian)
18. Bogolyubov V. S. *Aktual'nyye problemy krupnykh gorodov* [Actual problems of large cities]. St. Petersburg, 1997, 194 p. (in Russian)

19. Dolgov Yu. A. *Statisticheskoye modelirovaniye* [Statistical modeling]. Tiraspol', Pridnestrovskiy universitet Publ., 2011, 346 p. (in Russian)
20. Sokol'skaya Ye. V., Kochurov B. I., Dolgov Yu. A., Lobkovskiy V. A. *Mnogofaktornaya model' kak osnova dlya upravleniya kachestvom okruzhayushchey sredy urbanizirovannykh territoriy* [Multifactorial model as a basis for managing the quality of the environment in urban areas]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*, 2018, no. 2, pp. 26–34. (in Russian)
21. Ruban N. V. *Printsipy otsenki ekologicheskogo potentsiala landshaftov dlya tseley geoekologicheskogo rayonirovaniya* [Principles for assessing the ecological potential of landscapes for the purposes of geoecological zoning]. *Izvestiâ Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*, 2004, iss. 19, pp. 188–192. (in Russian)
22. *Ekspress-otsenka i prognozirovaniye risika vliyaniya na zdorov'ye naseleniya shuma, osnovnykh khimicheskikh veshchestv pri ingalyatsionnom i peroral'nom postuplenii: Instruktsiya po primeneniyu* [Express assessment and forecasting of the risk of impact on the health of the population of noise, basic chemicals during inhalation and oral intake: Instructions for use] : approved by Ministry of Health of the Republic of Belarus 05.01.07 / Developer institution: State Institution "Republican Scientific and Practical Center of Hygiene"; authors: S. M. Sokolov, V. P. Filionov, T. E. Naumenko, T. D. Gritsenko, A. E. Pshegrodna, L. N. Smirnov. Minsk, Republican Scientific and Practical Center for Hygiene, 2007, 31 p. (in Russian)
23. Snakin V. V. *Ekologiya i okhrana prirody: slovar'-spravochnik* [Ecology and nature conservation: a reference dictionary]. Moscow, Academia, 2000, 384 p. (in Russian)

Информация об авторе

Галкин Павел Александрович – магистр географических наук, старший преподаватель, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет (пр-т Фрунзе, 27, 210009, г. Витебск, Беларусь). Е-mail: galkin-pasha@yandex.ru

Information about the author

Pavel A. Galkin – M. Sc. (Geography), Senior Lecturer, Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University (27, Frunze Ave., 210009, Vitebsk, Belarus). E-mail: galkin-pasha@yandex.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-113-123>

УДК 553.97:502.05

Поступила в редакцию 04.03.2023

Received 04.03.2023

ОЦЕНКА НАРУШЕННОСТИ ТОРФЯНИКОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ СМОЛЕВИЧСКОГО РАЙОНА

О. Н. Ратникова, И. П. Лисицына, А. Т. Борш, И. В. Агейчик

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Анализ спутниковых снимков 42 торфяников общей площадью 25 168 га, или 18,5 % территории Смолевичского района Минской области, показал, что в ненаруженном состоянии (естественное болото) сохранилось около 14,8 % площадей торфяников, остальная их часть подверглась гидротехнической мелиорации. Площадь участков торфяных месторождений, выбывших из промышленной эксплуатации, составляет 41,4 %, из которых 70,2 % находятся в нарушенном состоянии. Даны сравнительная экологическая оценка выработанного участка торфяного месторождения Усяж с учетом генезиса, геоморфологических особенностей месторождения, гидрологических характеристик объекта, качества остаточного слоя торфа и подстилающих пород и возможных направлений использования, а также технико-экономическое и социальное обоснование целесообразности природоохранного направления использования.

Ключевые слова: торфяное месторождение; нарушенность торфяников; торф; уровень грунтовых вод; торфяная залежь; природоохранное использование; сельскохозяйственное использование.

Для цитирования. Ратникова О. Н., Лисицына И. П., Борш А. Т., Агейчик И. В. Оценка нарушенности торфяников и эффективность их использования на примере Смолевичского района // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 113–123.

ASSESSMENT OF DISTURBANCE OF THE PEATLANDS AND EFFICIENCY THEIR USE ON THE BASIS OF THE SMOLEVICH DISTRICT

O. N. Ratnikova, I. P. Lisitsyna, A. T. Borsh, I. V. Ageichik

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

Abstract. An analysis of satellite images of 42 peatlands with a total area of 25,168 hectares or 18.5 % of the territory of the Smolevichi district of the Minsk region showed that about 14.8 % of the peatlands remained intact (natural bog), the rest was subjected to hydrotechnical reclamation. The area of peat deposits retired from industrial exploitation is 41.4 %, of which 70.2 % are in a disturbed state. A comparative ecological assessment of the worked-out area of the Usyazh peat deposit is given, taking into account the genesis, geomorphological features of the deposit, hydrological characteristics of the object, the quality of the residual peat layer and underlying rocks and possible directions of use, as well as a feasibility study and social justification for the expediency of environmental protection use.

Keywords: peat deposit; disturbance of peatlands; peat; ground water level; peat deposit; conservation use; agricultural use.

For citation. Ratnikova O. N., Lisitsyna I. P., Borsh A. T., Ageichik I. V. Assessment of disturbance of the peatlands and efficiency their use on the basis of the Smolevichi district. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 113–123.

В условиях Беларуси приоритетными направлениями использования торфяников являются природоохранное, топливное, сельскохозяйственное, химико-технологическое, бальнеологическое и медицинское. Основные принципы их охраны и использования – сохранение естественных болот, рациональное использование ресурсов торфяников и др. [1, 2].

Болота выполняют ряд важных биосферных функций: незаменимых и заменимых. К незаменимым функциям относятся аккумулятивная, биологическая, межкруговоротная и ландшафтная, к заменимым – газорегуляторная, геохимическая, гидрологическая и климатическая [3]. В течение последних десятилетий большое внимание уделяется природоохранной роли болот и влиянию антропогенных факторов на динамику их развития. Установлено, что в Беларусь к 2030 г. необходимо реабилитировать не менее 15 % площади нарушенных торфяников [1]. Для обеспечения биосферно-совместимого использования требуется около 15–20 % от общей площади торфяного фонда района отнести

в природоохранный фонд различного назначения. Основные изменения на болоте связаны с гидротехнической мелиорацией, влияющей на водный режим как осушаемой территории, так и прилегающих участков. Понижение уровней грунтовых вод (УГВ) на 0,2–1,5 м и более от средней поверхности земли приводит к замещению нижних (моховой и травянистый) ярусов на высшие (кустарниковый, подрост, подлесок, кустарники и древесный). С течением времени происходит ослабление или полная потеря гидрологической функции, восстановление которой возможно лишь при проведении мероприятий экологической реабилитации.

Для экологической оценки Смолевичского района проанализировали нарушенные территории торфяников с использованием визуального метода дешифрирования спутниковых снимков Google Планета Земля, Yandex Satellite, Bing Satellite с разрешением 30 м/пикс и менее. Дешифровочными признаками участков разных категорий в пределах нулевой границы торфяного месторождения являлись: структура рисунка, его тональность в зависимости от степени обводненности различных элементов микроландшафта, наличие осушительной сети и ее параметры, структура и полнота древесного яруса. В результате исследований выделены следующие категории участков торфяников в зависимости от нарушенности:

- в естественном состоянии (болота), на которых происходят процессы болотообразования и торфонакопления. На данной категории торфяников отсутствует осушительная сеть, допускается ограниченное использование для осуществления отдельных видов хозяйственной и иной деятельности, не оказывающих отрицательного воздействия на болотные экологические системы (ведение лесного хозяйства, экологический туризм, сбор дикорастущих растений, сенокошение, ведение охотничьего и рыболовного хозяйства и др.) [2];

- покрытые лесной растительностью, на которых процессы болотообразования и торфонакопления происходят крайне медленно или вовсе отсутствуют. Территории характеризуются наличием древесного яруса и лесомелиоративных каналов, расстояние между которыми – около 500 м, используются для ведения лесного хозяйства. Отсутствие лесной растительности возможно из-за сплошной рубки или последствий ураганов;

- осушенные (осушенные земли с торфяными почвами), эффективно используемые в сельском хозяйстве, характеризуются наличием осушительной сети с разными параметрами произвольной формы;

- нарушенные и селитебные участки разрабатываемого фонда с действующими полями добычи; выбывшие из эксплуатации и находящиеся в брошенном состоянии, на которых процессы самовосстановления отсутствуют; покрытые древесно-кустарниковой растительностью, неэффективно используемые в сельском и лесном хозяйствах, а также населенные пункты, фермы, товарищества и др.

Анализ территории Смолевичского района Минской области (рис. 1) выявил 42 разведанных торфяника, площадью более 10 га, общей площадью 25 168 га в нулевой границе, или 18,5 % территории [4]. В естественном состоянии сохранилось лишь 3,7 тыс. га, или 14,8 % торфяников (2,7 % площади района). Наиболее крупные участки болот расположены в северной части района – Гайно-Бродня (2,2 тыс. га) и северо-восточной части – Судобль (0,7 тыс. га). На остальной территории района процессы торfonакопления и болотообразования прекращены или идут крайне медленно. Обводнено 3,1 тыс. га в результате естественных процессов заболачивания или рекультивации торфобрикетными заводами, большая часть которых – выбывшие из промышленной эксплуатации торфяные месторождения.

На территории района находятся пять особо охраняемых природных территорий: три республиканского значения – заказники «Волмянский», «Пекалинский» и «Гайно-Бродня», и два местного значения – заказники «Студенка» и «Маяк». В границах торфяных месторождений расположены заказники «Гайно-Бродня» (площадь – 1196 га, из которых 156 га находятся в естественном состоянии, а на 222 га идут процессы самовосстановления, остальная часть относится к нарушенным торфяникам) и «Студенка» (площадь – 776 га; создан в целях стабилизации водного режима нарушенного торфяника и прилегающих к нему территорий и восстановления среды обитания биологического разнообразия; лишь 50 га площади восстановлена, остальная нарушена).

Гидротехническая мелиорация на территории торфяников Смолевичского района привела к изменению естественного состояния болотных экосистем, флоры, фауны, процессов образования и накопления торфа, а также усугубила пожароопасную обстановку в районе расположения нарушенных участков. Около 85 % территории торфяников осушено. В сельском хозяйстве используется 9,4 тыс. га, или 37,5 % от их территории, в лесном хозяйстве – 1,3 тыс. га, или 5,0 %.

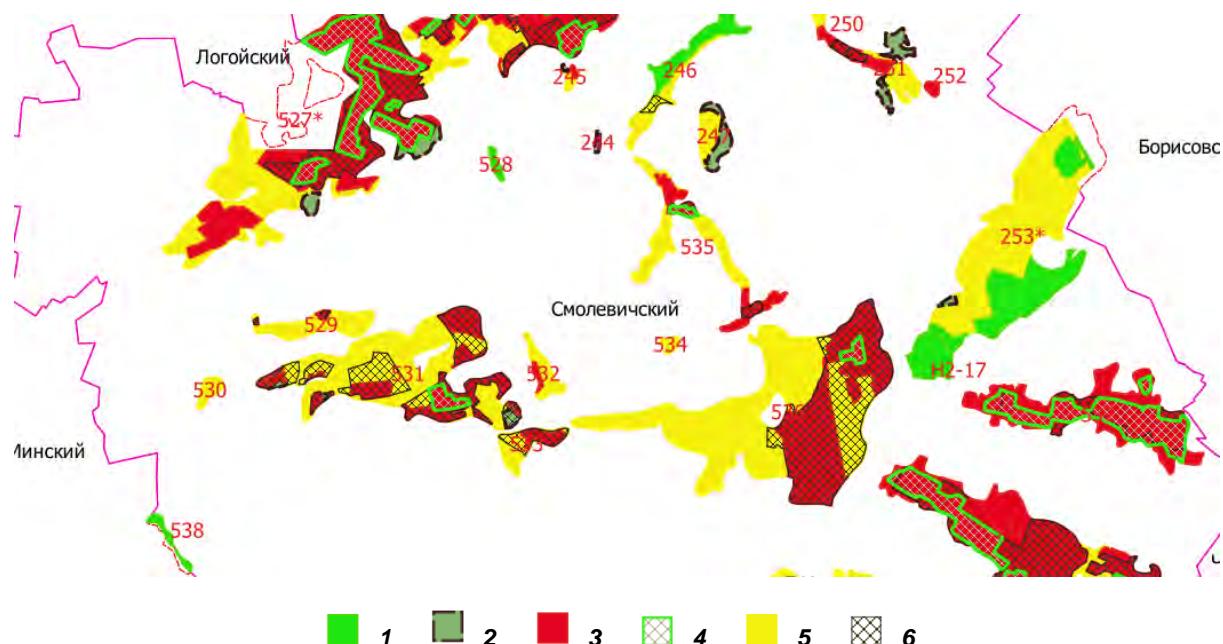


Рис. 1. Карта-схема нарушенности торфяников Смолевичского района Минской области:
1 – в естественном состоянии (болота); 2 – покрытые лесной растительностью (лесохозяйственное использование); 3 – нарушенные участки; 4 – восстановленный торфяник; 5 – осушенные для сельскохозяйственного использования; 6 – участки, выбывшие из промышленной эксплуатации

Fig. 1. Schematic map of distribution of peatlands of the Smolevichi district of the Minsk region:
1 – in natural state (bogs); 2 – covered with forest vegetation (forestry use); 3 – disturbed areas;
4 – restorated peatland; 5 – drained for agriculture; 6 – abandoned areas withdrawn from commercial use

Неудовлетворительную экологическую ситуацию в районе обуславливает наличие нарушенных торфяников, неэффективно используемых в сельском и лесном хозяйствах (площадь – 7,6 тыс. га, или 23,5 % от их территории). Яркими примерами таких нарушенных участков торфяных месторождений являются Гайно-Бродня (кадастровый номер 243), Усяж (527), Студенка (536), Радемье (542) и др. Поскольку доля осущененной территории торфяников Смолевичского района велика, существует необходимость для увеличения доли природоохранного направления их использования.

Неэффективное использование торфяников в сельском и лесном хозяйствах является результатом подтопления территории из-за низкого положения в рельефе или подстилания остаточного слоя торфа водоупорными грунтами (сапропель, суглинок, глина); неблагоприятного водно-воздушного режима для произрастания сельскохозяйственных и лесохозяйственных культур и условий для работы техники; увеличения расходных составляющих водного баланса осущенного торфяника за счет интенсивного стока грунтовых вод по действующей осушительной сети, особенно в весеннееводоводье, что приводит к перераспределению их запасов на прилегающих территориях и понижению УГВ. При сельскохозяйственном использовании верхняя осущенная часть залежи в результате усадки, минерализации органического вещества и эрозии торфа уменьшается в среднем на 5–20 мм в год, а скорость накопления торфа на болоте составляет 0,26 (для низинного типа) – 1,22 (для верхового типа) при благоприятных условиях достигает 1,0–2,0 мм в год [3], что в 10 раз медленнее, чем его разложение в осущенном слое.

На торфяниках в осущенном и заброшенном состояниях происходит процесс зарастания сорной растительностью и лесом. Деятельный (активный) горизонт болота в естественном состоянии имеет высокую пористость, а при осушении торфа сильно уплотняется из-за фрезерной добычи торфа, сельскохозяйственного использования, где по нему многоократно проходила тяжелая техника, под дорогами и бывшими узкоколейками, по которым вывозили торф. Такие участки неоднократно подвергаются пожарам: в осущенных торфяниках скрыт огромный запас горючего материала, в процессе горения при дефиците кислорода образующего полукокс и торфяной кокс, под которыми длительное время тлеет торф. Из-за того, что торфяной кокс прекрасно экранирует эти участки от воды, а также не пропускает тепло и дым, их сложно обнаружить и потушить [5].

Промышленная разработка торфяников для добычи торфа сопровождается как прямым, так и косвенным воздействием на биосферу: понижением УГВ не только на осушаемом участке, но и его сопредельных территориях (водосборе); удалением растительного покрова и изменением его видового

состава по периферии; выработкой торфяной залежи и, как следствие, изменением ландшафта торфяника и др. При сжигании торфа происходит высвобождение накопленной энергии, которая была ранее поглощена болотными фитоценозами, и выброс углекислого газа в атмосферу – углерод из геологического цикла в биологический. При этом в процессе горения потребляется огромное количество кислорода, что также наносит непоправимый ущерб атмосфере [6].

Ренатурализация болота, т. е. обязательное и полное его восстановление, невозможна вследствие значительного антропогенного воздействия, однако можно восстановить водно-минеральное питание на микроландшафтном уровне пространственной организации с возобновлением отдельных очагов болотообразования и торфонакопления за счет проведения мероприятий экологической реабилитации, направленных в первую очередь на восстановление УГВ.

В рамках исследований проанализировали территорию нарушенного торфяника Усяж, расположенного в Смолевичском районе Минской области (по справочнику торфяного фонда издания 1979 г., кадастровый номер 527) в нулевой границе (3202 га) и полностью подвергнутого гидротехнической мелиорации (рис. 2). К землям сельскохозяйственного использования относится 865 га, или 27,0 % от общей площади, к землям лесного хозяйства – 132 га, или 4,1 %, остальные площади находятся в нарушенном состоянии – 2205 га, или 68,9 %. На территории около 41 % торфяного месторождения, нарушенного в результате промышленной эксплуатации, произошло поднятие уровней воды и, как следствие, начались естественные процессы самовосстановления за счет отключения насосных станций сотрудниками ОАО «ТБЗ Усяж» и перекрытия существующих шлюзов.

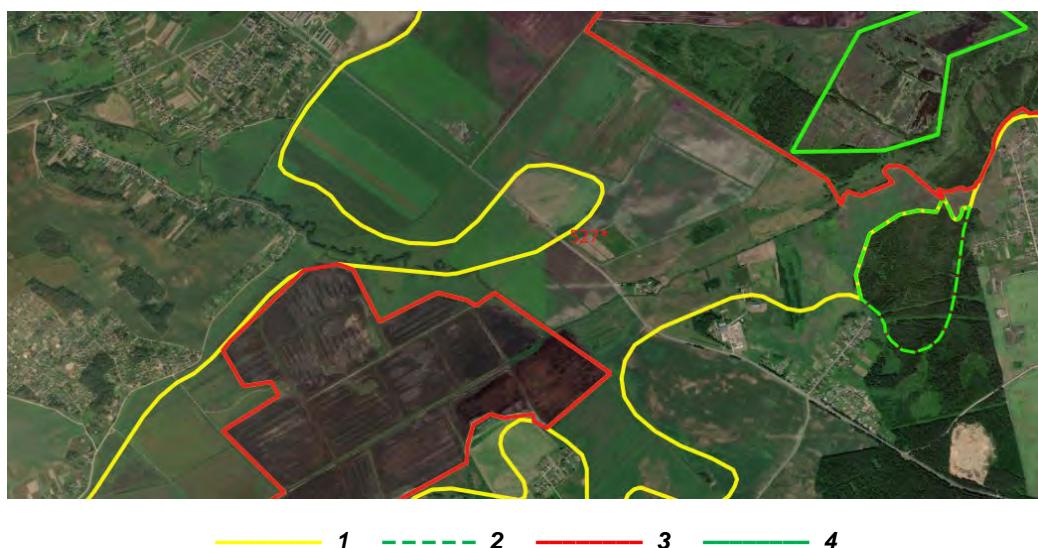


Рис. 2. Ситуационная схема современного состояния торфяника Усяж Смолевичского района Минской области: 1 – участок сельскохозяйственного использования; 2 – участок лесохозяйственного использования; 3 – нарушенный участок; 4 – восстановленный участок

Fig. 2. Situational scheme of the current state of the Usyazh peatland of the Smolevichi district of Minsk region: 1 – area for agricultural use; 2 – area for forestry use; 3 – disturbed area; 4 – restored area

В настоящее время у ОАО «ТБЗ Усяж» находится участок общей площадью 143,3 га, который был предоставлен во временное пользование для добычи торфа из сельскохозяйственных земель. Проектом на добычу после окончания срока временного пользования был предусмотрен возврат участка для использования в сельском хозяйстве, однако не были учтены агрохимические характеристики торфяной залежи и подстилающих пород, генетические и гидрологические особенности торфяного месторождения.

Для решения вопроса изменения направления использования исследуемого участка с сельскохозяйственного на природоохранное проанализировали общую экологическую обстановку Смолевичского района, оценили количество освоенных торфяных месторождений, мелиорированных площадей, а также природоохранных объектов района. С учетом геоморфологических и гидрологических особенностей торфяного месторождения Усяж и качественных характеристик оставшейся торфяной залежи необходимо выбрать дальнейшее наиболее рациональное направление использования выработанного участка в системе каналов У16–У18, а также экономически обосновать выбранное направление использования объекта исследования.

Согласно геоморфологическому районированию, торфяное месторождение Усяж расположено на Минской краевой ледниковой возвышенности Белорусской гряды. Геоморфологический район вытянут с севера на юг от верховьев Березины (днепровской) до верховьев Немана на расстоянии более 150 км. Морфологическая и генетическая связь Минской возвышенности с Ошмянскими грядами на западе выражена в амфитеатре краевых ледниковых комплексов, образующих дугу длиной 250 км. История формирования Минской возвышенности и ее геоморфология настолько сложны, что отдельные ее крупные участки имеют основание рассматриваться как самостоятельные геоморфологические районы (или подрайоны). Наибольшую роль в строении возвышенности играют ледниковые покровы днепровского оледенения, которые составляют около половины объема антропогеновых толщ. Моренные отложения представлены супесями, реже – суглинками, сильно завалуненными [7].

Сложность строения, большие абсолютные и относительные высоты в пределах Минской возвышенности создают признаки вертикальной геоморфологической ярусности. Верхний ярус (300–250 м) образуют узлы и угловые массивы, отличающиеся крупнохолмистым и грядовым рельефом. Холмы имеют куполовидную форму, придающую ландшафту облик сопочного мелкогорья. Значительные (до 30°) уклоны способствуют движению грунта по склонам и образованию скелетных почв. Вершины чаще всего покрыты лесом, на супесях преобладают сосновые лишайниковые боры с можжевельником в подлеске. В местах распространения суглинистых морен в составе леса появляется ель. Средний ярус занимает высоты 250–220 м и представлен среднеколмистым, увалистым рельефом с относительными превышениями 40–50 м над поверхностью равнин. В составе морен преобладают валунные суглинки и супеси. Вершины нередко увенчаны куполовидными комами, сложенными слоистыми песчаными отложениями. Активно развиваются склоновые процессы и формирование делювия. Растительность представлена суходолами и смешанными сосново-мелколиственными лесами с примесью ели. Пологие межхолмистые понижения распаханы. Нижний ярус на абсолютных высотах 220–180 м (рис. 3) представлен пологоволнистой водно-ледниковой и моренной равниной, наиболее высокие участки выделяются в виде комов и озовых гряд. Пологие южные и юго-западные склоны возвышенности нередко покрыты слоистыми лессовидными породами, их присутствие оказывает нивелирующее влияние на моренный рельеф и вместе с тем они стимулируют развитие эрозионных форм: оврагов, балок, рытвин. Нижний ярус в основном распахан. Участки леса кроме сосны включают ель, дуб и богатый кустарниковый подлесок [7].

Самый низкий ярус с высотами менее 170 м занимают долины рек, понижения спущенных озер, днища эрозионных врезов, где расположен исследуемый участок.

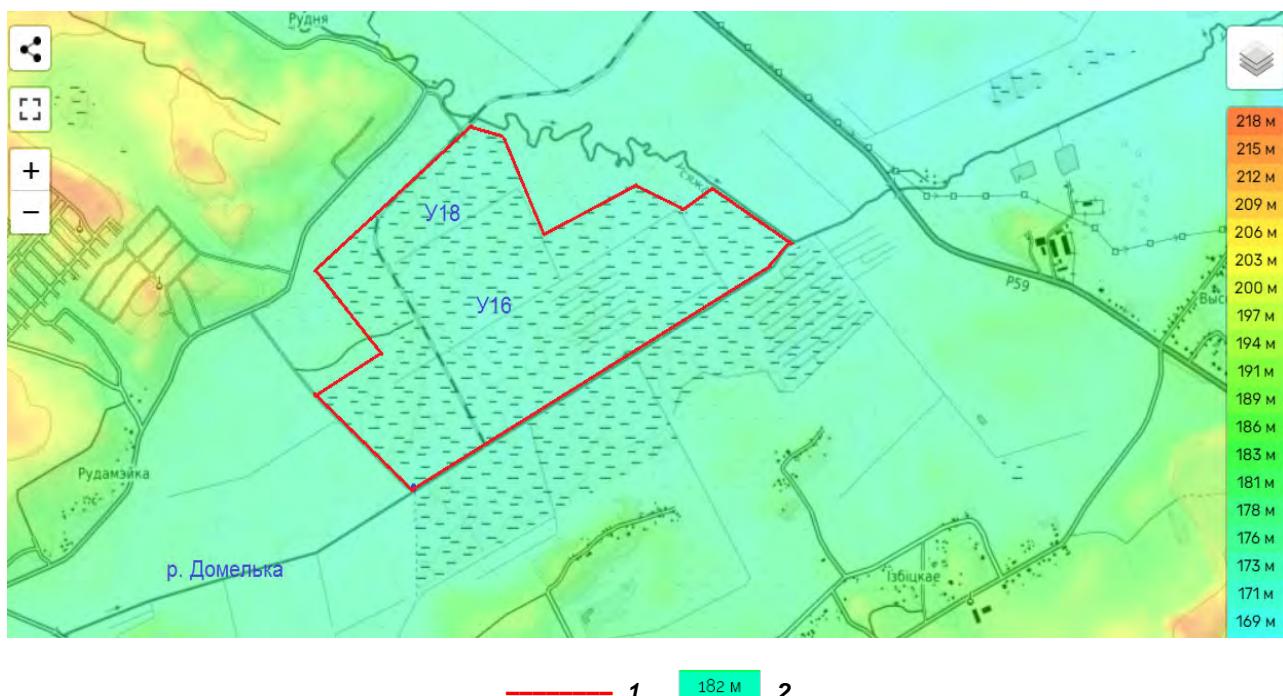


Рис. 3. Рельеф исследуемой территории (ru-ru.topographic-map.com):
1 – участок в системе каналов У16–У18; 2 – высота рельефа, м

Fig. 3. Relief of the researched territory (ru-ru.topographic-map.com):
1 – area in the U16–U18 canal system; 2 – relief height, m

Характерную особенность рельефу придают лёссовидные суглинки и супеси залегают непосредственно на моренных и водно-ледниковых отложениях и по возрасту относятся к позднему поозерью или раннему позднеледниковому. Благодаря значительной распаханности эти районы отличает интенсивная древняя и современная эрозия. На склонах балок и речных долин образуются молодые эрозионные рывтины, а на плакорах – суффозионные западины. Заметную роль в облике возвышенности играют техногенные формы, представленные карьерами, выемками по добыче торфа и др.

С севера, запада и юго-запада болото Усяж окружает конечноморенная равнина, сформированная в период отступания сожского ледника, осложненная вытянутыми краевыми моренными грядами и холмами, сложенная моренными супесями и суглинками, с прослойями, линзами и карманами песчано-гравийных отложений. С юго-восточной и восточной сторон к болоту примыкает пологоволнистая флювиогляциальная равнина, сложенная песчаными отложениями: от пылеватых до гравелистых.

В геологическом строении участка изысканий принимают участие *моренные (qllsz^v)* и *флювиогляциальные надморенные (fllsz^s)* отложения сожского горизонта, залегающие с поверхности на суходольных участках, окружающих торфяное месторождение и представленные песками, песчано-гравийными породами и супесями, с прослойями, линзами и карманами песков от мелких до гравелистых, с включением гальки, валунов; *аллювиальные отложения пойм (alV)*, представленные песками пылеватыми, мелкими и средними, с прослойками супеси пластичной и мягкопластичной консистенции, распространенные в ложе торфяного месторождения под торфом и сапропелем, в естественном залегании, находящиеся в водонасыщенном состоянии; *озерные отложения голоценового горизонта (lIV)*, представленные сапропелем, встречающиеся локально в центральной и северной частях торфяного месторождения, с изменением мощности от 0,1 до 1,1 м; *болотные отложения голоценового горизонта (blIV)*, представленные торфом низинного типа со степенью разложения 25–40 %, с изменением мощности от 0,0 до 4,2 м [8, 9].

Месторождение Усяж разделено реками Усяжа и Домелька на три части, торфяная залежь относится к низинному типу. В геоморфологическом отношении торфяное месторождение приурочено к пойме реки Усяжа, образовалось на месте древнего, выработанного ледником понижения и занимает широкую плоскую ложбину, сформировавшуюся в результате стока водных потоков тающего сожского ледника, по которому проложила свое русло река Усяжа и ее притоки (река Домелька и др.) (рис. 4).



Рис. 4. Территория торфяного месторождения Усяж до осушения (карта 1935 г.):
1 – нулевая граница торфяного месторождения Усяж; 2 – участок в системе каналов У16–У18

Fig. 4. Territory of the Usyazh peat deposit before draining (the map of 1935):
1 – zero boundary of the Usyazh peat deposit; 2 – area in the U16–U18 canal system

Река Усяжа и ее притоки, с одной стороны, способствовали отводу сточных и грунтовых вод, а с другой – накоплению их во время половодий и зазолению поверхности месторождения минеральными частицами. Благодаря богатому водно-минеральному питанию, из-за постоянного избыточного увлажнения и наноса с окружающих суходолов растворенных минеральных солей создаются предпосылки для заболачивания и постепенного накопления торфа низинного типа, повышенной зольности с прослойками мергеля и сапропеля на отдельных участках месторождения. Ниже торфа и донных отложений залегают мелкие и пылеватые пески и супеси. Исследуемый участок расположен на правобережной части поймы реки Усяжа. Естественный рельеф болота ровный, с незначительным уклоном на юго-восток, осложнен насыпями дорог, мелиоративными каналами.

После освоения торфяного месторождения для добычи торфа условия его водного питания существенно изменились (рис. 5). Современные гидрогеологические условия торфяного месторождения определяются геологическим строением района и его климатом. Исследуемый участок располагается в ложбинообразном понижении, в настоящее время осушен сетью мелиоративных каналов. Подземные воды вскрыты на глубине 1,1–2,1 м от поверхности земли. Водовмещающими грунтами служат торф, сапропель, пески и прослои песка, заключенные в толще супесей. Воды безнапорные. Питание водонапорного горизонта происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и паводковых вод рек Домелька и Усяжа.



Рис. 5. Современная гидрологическая сеть участка в системе каналов У16–У18:
1 – участок в системе каналов У16–У18 торфяного месторождения Усяж;
2 – линии стекания болотных вод; 3 – насосная станция

Fig. 5. Modern hydrological network of the area in the U16–U18 canal system:
1 – area in the U16–U18 canal system of the Usyazh peat deposit;
2 – drain lines of mire water; 3 – pumping station

Разгрузка верхних горизонтов подземного стока осуществляется на уровне речных эрозионных базисов, местной системы мелиоративных каналов и канализированной реки Домелька, протекающей через весь участок с северо-востока на юго-запад (правый приток Усяжи) на территории Смолевичского района. Исток реки начинается возле д. Богута, длина реки – 11 км, русло в нижнем течении канализировано, площадь водосбора – 51 км². В течение года может происходить сезонное изменение положения уровня грунтовых вод, связанное с объемом выпадающих осадков. Водосборная площадь исследуемого участка составляет более 500 га [8, 9].

В первые восемь лет проектом предусматривалось самотечное осушение производственных площадей со сбросом сточных вод по магистральным каналам У16 и У18 и далее в реку Домелька. Далее осушение проводилось с помощью насосной станции, расположенной в восточной части иссле-

дуемого участка. После выбытия исследуемых площадей из промышленной эксплуатации из-за отключения насосной станции произойдет поднятие УГВ выше поверхности земли, по краям образовавшихся небольших водоемов будут развиваться болотные фитоценозы низинного типа.

Для технико-экономической оценки объекта исследования в первую очередь рассмотрели его сельскохозяйственное направление использования, которое предусмотрено строительным проектом, а далее – общую экономическую (стоимостную) оценку ресурсов с учетом экологических особенностей, которая включает в себя экономическую эффективность извлекаемых запасов торфяного месторождения для промышленных целей, а также определение экономической ценности использования торфяного месторождения в качестве природоохранного объекта.

Стоимость произведенной продукции рассчитана исходя из объемов продукции в натуральном выражении применительно к исследуемому участку и сложившихся цен на рынке на указанную продукцию (на 1 января 2023 г.).

В сельском хозяйстве осушенные земли с торфяными почвами преимущественно используют для выращивания многолетних трав и выпаса сельскохозяйственных животных [2]. В большинстве случаев продуктивность сенокосов на выработанных площадях не превышает 8–10 ц/га кормовых единиц. При использовании исследуемого участка площадью 143,3 га объем сена составит 1289,73 ц в год, или 1289,7 т за 10 лет. Рыночная стоимость сена колеблется в пределах 360–450 руб/т в зависимости от вида кормов. При выращивании многолетних трав на исследуемом участке в течение 10 лет прибыль составит около 515 880,00 руб. Однако стоит отметить, что при использовании данного участка в сельском хозяйстве в течение года эмиссия диоксида углерода в атмосферу с выработанной части составляет 990 т (CO₂ в год), годовой сток органических веществ – 54 т, годовой сток минеральных веществ – 66 т [10].

В проектной документации для объектов добычи торфа должны предусматриваться мероприятия по рекультивации земель, направленные на использование выработанных торфяников преимущественно в природоохранных целях [2]. При природоохранном направлении использования таких участков не регламентируется мощность остаточного слоя торфа. В случае же передачи земель для ведения сельского хозяйства остаточный слой торфа должен быть не менее 0,5 м [11].

После экологической реабилитации болота восстанавливается ряд природно-хозяйственных и биосферных функций. Создаются условия для рекреации, сохранения качества питьевой воды, поддержания водного баланса, восстановления видового разнообразия объектов животного и растительного мира, поддержания естественного баланса прилегающих территорий. Большая часть из них не является ограниченной с точки зрения их доступности для пользования и не поддается точному ценовому расчету.

В первую очередь изменение направления использования позволит доработать предприятию оставшийся 0,5-метровый слой торфяной залежи и увеличить объем добычи торфа в размере 164 900 т торфа (условной 40%-й влажности). Стоимость 1 т торфа – 7,44 руб., следовательно, чистый доход для предприятия составит 1 226 856,00 руб.

Стоимость проведения мероприятий экологической реабилитации (строительства каскада перемычек для поддержания уровней грунтовых вод равномерно по всей площади восстанавливаемого участка на уровне 0–0,2 м ниже поверхности земли) в среднем в республике составляет около 162,00 руб. за 1 га. Для восстановления исследуемого участка необходимо затратить около 23 215,20 руб. Проведенные мероприятия по экологической реабилитации позволят снизить негативное воздействие на объекты животного мира и среду их обитания. Изменение направления использования на природоохранное позволит расширить видовое разнообразие птиц открытых пространств и численность ряда видов лесных птиц в связи с улучшением кормовых условий из-за увеличения древесно-кустарниковой растительности. Также ожидается появление на гнездовании видов птиц, биотически связанных с тростниками зарослями и низинными болотами, таких как большая выпь, болотный лунь, бекас, и увеличение численности кряквы, тростниковой овсянки.

Исходя из ресурсной стоимости объектов животного мира (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 7 февраля 2008 г. № 168) и видового разнообразия восстановленного участка, доход составит около 56 124,73 руб. за 10 лет.

Стоимость косвенного использования болотных угодий определена на основании порядка проведения поэлементной стоимостной оценки экосистемных услуг [12]. Для исследуемого участка стоимостная оценка составит 25 661,91 руб. за 10 лет. Торфяно-болотные экосистемы, являясь огромным углеродным резервуаром, играют положительную роль в формировании углеродного баланса и выполняют функцию сдерживающего фактора в изменении климата в сторону его потепления. Депонирование углерода лесными системами совместно с болотными угодьями составляет ежегодно порядка 0,5–0,8 млрд т, или, в пересчете на содержание углекислого газа (CO₂), 1,8–2,9 млрд т.

После экологической реабилитации, начиная со второго-третьего года, ожидаемый экономический эффект от природоохранного использования исследуемого участка с каждым годом будет возрастать за счет расширения экологических услуг: сорбционной (водоочистительной) функции, воспроизведения лесной, кустарниковой растительности, дикорастущих лекарственных и пряно-ароматических растений, а также воспроизводства водных ресурсов. Сельскохозяйственное использование с течением времени (20–30 лет), напротив, приведет к уменьшению продуктивности сенокосов и деградации оставшегося слоя торфа.

Выводы.

1. В результате оценки нарушенности Смолевичского района установлено, что гидротехническая мелиорация привела к неудовлетворительной экологической ситуации из-за освоения 85 % территории торфяников. Данные преобразования являются основным критерием для увеличения доли природоохранного направления использования за счет проведения мероприятий экологической реабилитации нарушенных торфяников.

2. Сохранение современного режима интенсивного осушения по всей площади торфяного месторождения Усяж (осушено – 100 % территории), а также наличие около 28 % нарушенных участков и увеличение их доли за счет неэффективного сельскохозяйственного и лесохозяйственного использования сопровождается дальнейшей дестабилизацией гидрологического режима территории района.

3. Согласно анализу экологических условий участка в системе каналов У16–У18 торфяного месторождения Усяж, выбывшего из промышленной эксплуатации, сельскохозяйственное использование невозможно из-за пойменного залегания и мозаичной картины подстилания породами различной водопроницаемости (песок, гравий, сапропель), на которых после выработки торфа невозможно создать стабильный водно-воздушный режим с хорошей аэрацией и окислительно-восстановительным потенциалом, необходимым для произрастания сельскохозяйственных культур. Огромные финансовые затраты для поддержания уровней воды при помощи насосной станции не обеспечат условия для их произрастания. Часть выработанной площади (вдоль мелиоративных каналов) останется в осушенном состоянии, где будут интенсивно происходить процессы минерализации органического вещества в торфе, через некоторое время на поверхность выйдут подстилающие породы, а часть будет подтапливаться паводковыми и ливневыми водами, что повлечет за собой невозможность использования сельскохозяйственной техники.

4. Возврат выработанных участков торфяных месторождений в естественное состояние путем реализации мероприятий экологической реабилитации запустит природный механизм по выводу углекислого газа из атмосферы, осуществляя ежегодный прирост растений-торфообразователей и накопление торфа. Выбор природоохранного направления на объекте исследования обеспечит восстановление утраченных биосферных функций, начнутся процессы восстановления гидрологического режима, болотного микроландшафта для болотных и околоводных растений, восстановления среды обитания для биологического разнообразия, что, в свою очередь, будет способствовать стабилизации экологической обстановки в Смолевичском районе, а также получит значительный экономический и социальный эффекты.

5. Изменение направления использования сельскохозяйственного на природоохранное позволит доработать предприятию оставшийся 0,5-метровый слой торфяной залежи и увеличить объем добычи торфа в размере 164,9 тыс. т условной 40%-й влажности, сэкономить государственные средства на дорогостоящую сельскохозяйственную рекультивацию. Доход от прямого и косвенного десятилетнего природоохранного направления использования участка может в 2,5 раза превысить соответствующие показатели от использования этого участка в сельском хозяйстве.

6. Природоохранное направление способствует биосферносовместимому использованию его для туризма; фотоохоте на редких животных и птиц, находящихся в естественных условиях; сбору грибов, заготовке дикорастущих ценных ягод, медоносных и лекарственных растений (вахта, сабельник, багульник, росянка, сфагnum и др.) и другой продукции леса; оказанию услуг туристам и посетителям, связанных с проживанием, питанием и отдыхом. Кроме того, развитие деятельности по экологическому и сельскому туризму и связанные с ним различного рода услуги позволят решать и социально-экономические проблемы проживающего в Смолевичском районе населения. При оказании экологических услуг населению представится возможность получать более высокие доходы и обеспечить его занятость.

Список использованных источников

1. Схема распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 г. : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 30.12.2015 № 1111.
2. Об охране и использовании торфяников : Закон Респ. Беларусь от 18.12.2019 № 272-З.

3. Бамбалов, Н. Н. Роль болот в биосфере / Н. Н. Бамбалов, В. А. Ракович. – Минск : Беларуская навука, 2005. – 208 с.
4. Схемы рационального использования торфяных месторождений и охраны торфяных болот Республики Беларусь на период до 2030 года / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования ; [науч. ред. Н. Н. Бамбалов]. – Минск : Беларуская навука, 2016. – 167 с. Номер регистрации проекта международной технической помощи в Министерстве экономики Респ. Беларусь 2/12/000571 от 30.11.2012.
5. Рекомендации по тушению торфяных пожаров на осущеных болотах / ОМННО «Совет Greenpeace» ; гл. ред. О. Г. Илюшина. – М., 2020. – 192 с.
6. Углеродные кредиты и заболачивание деградированных торфяников: климат – биоразнообразие – землепользование: теория и практика – уроки реализации pilotного проекта в Беларуси [пер. с нем.] / ред. : Франциска Таннебергер и Венделин Вихтманн. – Штутгарт: Schweizerbart Science, 2011. – XII. – 221 с.
7. Матвеев, А. В. Рельеф Белоруссии / А. В. Матвеев, Б. Н. Гурский, Р. И. Левицкая. – Минск : Университетское, 1988. – 320 с.
8. Строительный проект: Подготовка площадей для добычи фрезерного торфа на торфяном месторождении «Усяж» в системе каналов У16–У18 в районе д. Рудня Смолевичского района Минской области. Кн. 1: Общая пояснительная записка / Бел. концерн по топливу и газификации «Белтопгаз», исполн.: дир. В. В. Карпенко, гл. инж. В. В. Борисейко, гл. инж. проекта Н. Н. Кранцевич. Объект № 2000-10/2. Инв. № 35958. – Минск, 2011. – 140 с.
9. Строительный проект : Подготовка площадей для добычи фрезерного торфа на торфяном месторождении «Усяж» в системе каналов У16–У18 в районе д. Рудня Смолевичского района Минской области. Кн. 4: Материалы по отводу земель. Рекультивация выработанных площадей / Бел. концерн по топливу и газификации «Белтопгаз», исполн: дир. В. В. Карпенко, гл. инж. В. В. Борисейко, гл. инж. проекта Н. Н. Кранцевич. Объект № 2000-10/2. Инв. № 35961. – Минск, 2011. – 98 с.
10. Бамбалов, Н. Н. Баланс органического вещества торфяных почв и методы его изучения / Н. Н. Бамбалов. – Минск : Наука и техника, 1984. – 175 с.
11. Охрана окружающей среды и природопользование. Территории. Правила и порядок определения и изменения направлений использования выработанных торфяных месторождений и других нарушенных болот : ТКП 17.12-01-2008 (02120) / Разработчик РУП «Бел НИЦ «Экология». – Минск, 2008. – 19 с.
12. Охрана окружающей среды и природопользование. Порядок проведения работ по стоимостной оценке экосистемных услуг и определения стоимостной ценности биологического разнообразия : ТКП 17.02-10-2013 (02120) / Разработчик РУП «Бел НИЦ «Экология». – Минск, 2013. – 19 с.

References

1. *Skhema raspredeleniya torfyanikov po napravleniyam ispol'zovaniya na period do 2030 g.* [The outline of the distribution of peatlands per type of use until 2030]. Approved by Council of Ministers of the Republic of Belarus, 30 December 2015, no. 1111. (in Russian)
2. *Ob ohrane i ispol'zovanii torfyanikov: Zakon Respubliki Belarus' № 272-3* [Law of the Republic of Belarus no. 272-3 "On the protection and use of peatlands"]. December 18, 2019. (in Russian)
3. Bambalov N. N. *Rol' bolot v biosphere* [The role of swamps in the biosphere]. Minsk, Belarusian Science Publ., 2005, 208 p. (in Russian)
4. *Shemy ratsional'nogo ispol'zovaniya torfyanyh mestorozhdeniy i ohrany torfyanyh bolot Respybliki Belarus' na period do 2030 goda* [Schemes for the rational use of peat deposits and the protection of peat bogs in the Republic of Belarus for the period up to 2030]. Nac. akad. nauk Belarusi, In-t prirodopol'zovaniya [NAS of Belarus, Institute of Nature Management]. Sci. ed. N. N. Bambalov. Minsk, Belarusian Science Publ., 2016, 167 p. RN of the int. technical assistance project in the Ministry of Economy of the Republic of Belarus 2/12/000571, 30 November 2012. (in Russian)
5. *Rekomendacii po tusheniyu torfyanyh pozharov na osushennyyh bolotah* [Recommendations for extinguishing peat fires in drained bogs]. BINNO "Greenpeace Council". Chief ed. O. G. Ilyushina. Moscow, 2020, 192 p. (in Russian)
6. *Uglerodnye kreditы i zabolachivanie degradirovannyh torfyanikov: klimat – bioraznoobrazie – zemlepol'zovanie: teoriya i praktika – uroki realizacii pilotnogo proekta v Belarusi* [Carbon credits and waterlogging of degraded peatlands: climate – biodiversity – land use: theory and practice – lessons from the pilot project in Belarus]. Ed.: Francisca Tanneberger i Vendelin Vihtmann. Stuttgart, Schweizerbart Science Publ., 2011, XII, 221 p. (in Russian)
7. Matveev A. V., Gursky B. N., Levitskaya R. I. *Rel'ef Belorussii* [Relief of Belarus]. Minsk, University Publ., 1988, 320 p. (in Belarusian)
8. *Stroitel'nyj proekt: Podgotovka ploshchadej dlya dobyschi frezernogo torfa na torfyanom mestorozhdenii "Usyazh" v sisteme kanalov U16–U18 v rajone d. Rudnya Smolevichskogo rajona Minskoy oblasti. Kn. 1: Obshchaya poyasnitel'naya zapiska* [Construction project: Preparation of areas for the extraction of milled peat at the Usyazh peat deposit in the U16–U18 canal system near the village of Rudnya, Smolevichi district, Minsk region. Book 1: General Explanatory Note]. PNIRUP Belgiprotogaz, executed by: V. V. Karpenko, V. V. Borisejko, N. N. Krancevich. Object no. 2000-10/2, inventory no. 35958. Minsk, 2011, 140 p. (in Russian)
9. *Stroitel'nyj proekt: Podgotovka ploshchadej dlya dobyschi frezernogo torfa na torfyanom mestorozhdenii "Usyazh" v sisteme kanalov U16–U18 v rajone d. Rudnya Smolevichskogo rajona Minskoy oblasti. Kn. 4: Materialy po otvodu zemel'. Rekul'tivaciya vyrobottannyh ploshchadej* [Construction project: Preparation of areas for the extraction of milled peat at the Usyazh peat deposit in the U16–U18 canal system near the village of Rudnya, Smolevichi district,

- Minsk region. Book 4: Materials on land acquisition. Recultivation of mined-out areas]. PNIRUP Belgiprotogaz, executed by: V. V. Karpenko, V. V. Borisejko, N. N. Krancevich. Object no. 2000-10/2, inventory no. 35961, Minsk, 2011, 98 p. (in Russian)
10. Bambalov N. N. *Balans organicheskogo veschestva torfyanyh pochv i metody ego izycheniya* [Balance of organic matter of peat soils and methods of its study]. Minsk, Science and Technology Publ., 1984, 175 p. (in Russian)
 11. *Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Territorii. Pravila i poryadok opredeleniya i izmeneniya napravlenij ispol'zovaniya vyrabotannyh torfyanyh mestorozhdenij i drugih narushennyh bolot* [Environmental protection and nature management. Territories. Rules and procedure for determining and changing the directions for the use of depleted peat deposits and other disturbed bogs]. Technical code of good practice 17.12-01-2008 (02120). Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2008, 19 p. (in Russian)
 12. *Poryadok provedeniya stoimostnoy otsenki ekosistemnyh uslug i opredeleniya stoimostnoy tsennosti biologicheskogo raznoobraziya* [Procedure for valuation of ecosystem services and determination of the value of biological diversity]. Technical code of good practice 17.02-10-2013 (02120). Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2013, 23 p. (in Russian)

Информация об авторах

Ратникова Ольга Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: 306peatlands@mail.ru

Лисицына Ирина Петровна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: i_lisitsyna@list.ru

Борш Анна Тадеушевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anna.borsh.1992@mail.ru

Агейчик Инна Валерьевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Ageichik.iv@mail.ru

Information about the authors

Olga N. Ratnicava – 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: 306peatlands@mail.ru

Irina P. Lisitsyna – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: i_lisitsyna@list.ru

Anna T. Borsh – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (F. Skoriny Str., 10, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anna.borsh.1992@mail.ru

Inna V. Ageichik – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Ageichik.iv@mail.ru

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-124-134>

УДК 551.2+551.3[476.2+476.7]

Поступила в редакцию 30.03.2023
Received 30.03.2023

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

А. В. Матвеев

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основании многолетних полевых работ, выполненных расчетов количественных характеристик интенсивности проявления отдельных видов геологических процессов, исследований на геодинамических полигонах и с использованием опубликованных данных, топографических карт и материалов дистанционных съемок построены схемы проявления, и охарактеризованы три класса современных геологических процессов (экзогенных, эндогенных и техногенных). Выявлена определенная дифференциация их проявления по площади и интенсивности. Установлено, что на участках экстремального развития процессов происходит нарушение природных комплексов и хозяйственных сооружений, а в исключительных случаях происходит их полное разрушение.

Ключевые слова: Белорусское Полесье; современные геологические процессы; схемы; особенности проявления.

Для цитирования. Матвеев А. В. Современные геологические процессы на территории Белорусского Полесья // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 124–134.

MODERN GEOLOGICAL PROCESSES IN THE BELARUSIAN POLESIE AREA

A. V. Matveyev

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

Abstract. Materials of years of field work, calculations of quantitative characteristics of the manifestation intensity of particular geological processes, studies at geodynamic polygons and also published data, topographic maps and remote sensing information were analyzed. On this basis schemes of modern geological processes manifestation were constructed and their three classes (exogenous, endogenous and technogenic) were characterized. A certain differentiation of their manifestation in terms of area and intensity was revealed. It has been found that natural complexes and outbuildings are disturbed or in exceptional cases completely destructed in areas of extreme development of these processes.

Keywords: Belarusian Polesie; modern geological processes; schemes; manifestation features.

For citation. Matveyev A. V. Modern geological processes in the Belarusian Polesie area. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 124–134.

Неоднородности в геологическом строении и рельефе земной поверхности являются одной из основных причин повсеместного проявления современных геологических процессов, интенсивность которых может иногда достигать таких значений, при которых отдельные виды морфо- и геодинамики вызывают деформацию природных комплексов, могут наносить определенный ущерб экономике государств и негативно влияют на здоровье населения. Поэтому изучению этих процессов уделяется внимание во всех развитых странах. Выполняются подобные работы и в Беларуси. Ими занимаются специалисты во всех университетах страны, многих институтах НАН Беларуси и других ведомств [1, 2]. В последние десятилетия подобные исследования под руководством автора статьи проводились в Институте природопользования НАН Беларуси и Брестском государственном университете им. А. С. Пушкина по разным частям территории Белорусского Полесья. В процессе этих исследований собран обширный фактический материал. Однако построение по отдельным частям

региона схемы современной геодинамики [4–6] создавались по несколько различающимся методикам, контуры проявления отдельных геодинамических процессов не увязаны между соседними территориями. Поэтому особенности современной геодинамики территории Белорусского Полесья как единого, своеобразного природного комплекса до сих пор не были охарактеризованы. Это и послужило предпосылкой для проведения соответствующих исследований и написания представляемой статьи.

Характеристика современных геологических процессов выполнена с использованием опубликованных материалов [2–7], многолетних полевых исследований, количественных характеристик рельефа, топокарт и материалов дистанционных съемок. Это позволило построить новые схемы современных геологических процессов, охарактеризовать основные их типы и виды. Однако с учетом более мелкого масштаба работ некоторые виды процессов, выделявшиеся ранее, на представленных в статье схемах не отражены (процессы в береговой зоне водохранилищ, крип, местная диффузия и некоторые другие). Следует также подчеркнуть, что при характеристике процессов основное внимание обращалось на те из них, которые наиболее заметно влияют на геоэкологическую обстановку.

Проведенные исследования показали, что земная поверхность на территории Белорусского Полесья испытывает разнообразное преобразование под влиянием геологических процессов, которые традиционно делятся на три класса: экзогенный (водная и ветровая эрозия и аккумуляция, суффозия и карст, обвалы и оползни, биогенный морфо- и седиментогенез), эндогенный (сейсмичность, вертикальные и горизонтальные движения земной коры, геодинамика зон разрывных нарушений) и техногенный (нарушения земной поверхности и покровных отложений при добыче полезных ископаемых, строительстве инженерных сооружений, свалки и др.).

Рассмотрим подробнее каждый из этих классов, общие особенности проявления которых показаны на схемах (рис. 1, 2).

ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Это наиболее распространенный и многочисленный класс современной геодинамики (прежде всего морфодинамики), одним из характерных видов которого является эрозия временных водотоков, выраженная в виде плоскостного (делювиального) смыва и линейных форм размыва поверхности. Плоскостной смыв на территории Белорусского Полесья имеет ограниченный характер, его интенсивность чаще всего не превышает 2 мм/год, что преимущественно компенсируется естественными процессами почвообразования. Развитые здесь значительные площади болотных массивов и выпложенных заболоченных низин практически не подвержены или слабо затронуты эрозией. По результатам наблюдений на ключевых участках на пологоволнистых площадях ежегодный снос со склонов моренно-водно-ледниковых равнин составляет 9,3–17,4 т/га/год, водно-ледниковых равнин – 7,2–12 т/га/год [4], т. е. не превышает первых долей мм в год. Большая часть перемещаемого материала образует шлейфы у подножий склонов, меньшая часть (мелкой и тонкой размерности) попадает в реки.

Несколько повышенная интенсивность этого процесса (до 4 мм/год) выявлена на относительно небольших площадях – на склонах Новогрудской возвышенности, в пределах Высоковской равнины, Загородья и отдельных участков краевых ледниковых образований в районе г. Хойники, северо-западнее г. Солигорска, юго-восточнее г. Чечерска и др. Наибольшие же величины делювиального сноса установлены на Мозырской возвышенности (до 7,2 мм/год).

Относительно ограниченно на характеризуемой территории проявляется также эрозия линейных временных водотоков, экстремальные формы которых чаще всего встречаются на Мозырской возвышенности, в левобережье Припяти у д. Юревичи, правобережье Днепра на участке от г. Речицы до г. Лоева и в районе г. Жлобина, на склонах долины Сожа и его притоков. На большей части территории в перечисленных районах плотность овражно-балочной сети не превышает 2 км/км², но на участке долины р. Уть (в районе д. Гордуны Добрушского района Гомельской области) достигает 9 км/км², на Мозырской возвышенности – до 6 км/км².

Как правило, овраги имеют длину, измеряемую сотнями метров, их врез обычно 2–5 м (до 7–10 м). Однако наиболее крупные их формы (особенно на Мозырской возвышенности) протягиваются до 2–3 км при глубине до 20–30 м. На склонах таких форм выделяется до 2–4 террас, которые примерно опираются на пойменные и надпойменные террасы Припяти. Среди оврагов около 10–15 % являются активными (на Мозырской возвышенности – до 30 %). Средняя скорость прироста – 0,3–3,5 м/год [8]. При нерациональном использовании межовражных пространств эти значения могут возрастать на порядок.

Слабее выражены формы, образованные временными линейными водотоками в западной части Полесья, где на территории Высоковской, Каменецкой, Коссовской равнин, вдоль Мухавца и на стенках крупных карьеров образуются промоины, чаще всего длиной до 200 м и глубиной до 3,5 м, при максимальных значениях длины до 300 м и глубины до 8 м (у д. Паникви Каменецкого района Брестской области).

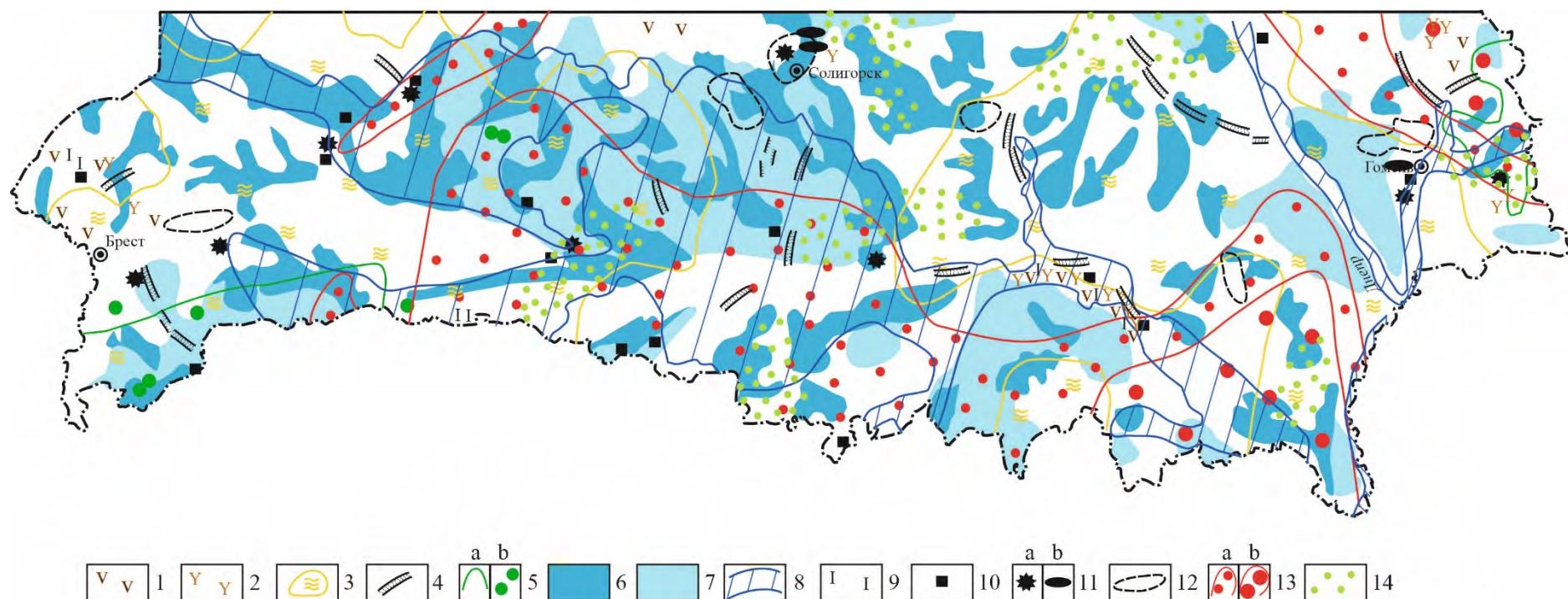


Рис. 1. Современные экзогенные и техногенные геологические процессы на территории Белорусского Полесья:

1 – плоскостная эрозия (2 мм/год и более); 2 – овражная эрозия; 3 – экстремальная дефляция (пыльные бури);
 4 – гравитационные процессы; 5 – карст (а – потенциальный, б – реальный); 6 – болотные процессы; 7 – заболачивание;
 8 – подтопление и затопление при паводках; 9 – супфозия; 10 – техногенные денудационные процессы (карьеры);
 11 – техногенные аккумулятивные процессы (а – свалки, б – отвалы); 12 – проявление комплекса техногенных процессов;
 13 – geoхимические аномалии в покровных отложениях (а – умеренной опасности, б – опасные); 14 – радионевые аномалии в почвенном воздухе

Fig. 1. Modern exogenous and technogenic geological processes in the Belarusian Polesie area:

1 – planar erosion (2 mm/year and more); 2 – gully erosion; 3 – extreme deflation (dust storms); 4 – gravity processes; 5 – karst (a – potential, b – real);
 6 – swamp processes; 7 – waterlogging; 8 – flooding and underflooding during freshets; 9 – suffusion; 10 – technogenic denudation processes (quarries);
 11 – technogenic accumulative processes (a – landfills, b – stockpiles); 12 – manifestation of a complex of technogenic processes;
 13 – geochemical anomalies in cover sediments (a – of moderate danger, b – dangerous); 14 – radon anomalies in soil air

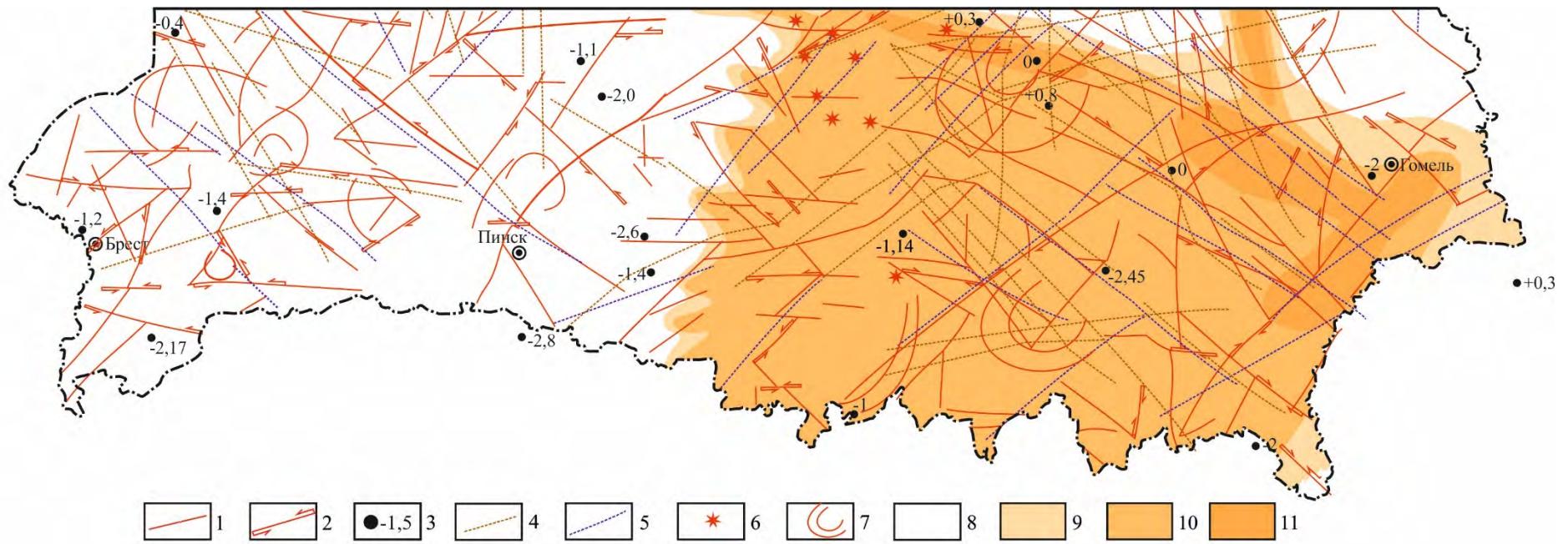


Рис. 2. Современные эндогенные геологические процессы на территории Белорусского Полесья:
 1 – высокие градиенты скоростей вертикальных движений земной коры в зонах активных разломов;
 2 – участки проявления горизонтальных движений; 3 – отдельные значения скоростей вертикальных движений (мм/год);
 геодинамические процессы в зонах наиболее протяженных космолинеаментов (4) и тополинеаментов (5);
 6 – эпицентры землетрясений; 7 – проявление в земной поверхности кольцевых структур фундамента и чехла;
 территории, в пределах которых возможны проявления сейсмических процессов интенсивностью
 менее 5 баллов (8); 5–6 баллов (9); 6–7 баллов (10); 7 баллов (11) (с использованием материалов [1, 9])

Fig. 2. Modern endogenous geological processes in the Belarusian Polesie area:
 1 – high gradients of vertical movements' rate of the earth's crust in the zones of active faults;
 2 – areas of horizontal movements' manifestation; 3 – particular values of the rates of vertical movements (mm/year);
 geodynamic processes in the zones of the most extended cosmolineaments (4) and topolineaments (5); 6 – earthquake epicenters;
 7 – manifestation of the circular structures of the basement and sedimentary cover in the earth's surface;
 areas where manifestations of seismic processes with an intensity of less than 5 points (8); 5–6 points (9);
 6–7 points (10); 7 points (11) are possible (according to [1, 9])

Эрозионная и аккумулятивная деятельность рек. Деятельность постоянных линейных водотоков – один из самых активных современных геологических процессов. Основными видами этой деятельности являются эрозия, перенос и аккумуляция продуктов размыва. Реки исследованного региона имеют спокойный характер течения, хотя на отдельных участках эрозионная деятельность водного потока возрастает, что прослеживается в подмывах и обрушениях коренных берегов. Общая длина наиболее значительных рек превышает 3000 км. Самыми протяженными являются Припять (протекает на территории Полесья на расстоянии около 500 км), Днепр (около 300 км), Сож (250 км), Ясьельда (250 км), Уборт (около 130 км), Лань (120 км), Западный Буг (115 км) и др.

Об объеме произведенной постоянными водотоками «работе» могут свидетельствовать данные по врезу речных долин, их длине и мощности аллювия, отложенного за последние 10–11 тыс. лет. Приведем соответствующие значения только по некоторым водотокам: Ясьельда – ширина долины от 2–4 до 6–8 км, врез варьирует от 2–3 до 20 м, мощность аллювия – 11–16 м; Западный Буг – ширина долины до 3–4 км, врез 12–36 м, мощность аллювия 8–19 м; Припять – ширина долины от 2–4 до 8–19 км, врез 15–25 м, в низовьях – до 50 км и более, мощность аллювия 10–16 м; Днепр – ширина 3–10 км (при слиянии с Сожем – до 20 км, с Припятью – до 50 км и более), врез 20–30 м (до 35 м и более), мощность аллювия – 15–29 м; Сож – ширина голоценовых террас – 1,5–5,0 км (до 20 км в низовье), врез 10–25 м, мощность аллювия – 8–10 м (до 14 м).

Проведенные исследования и выполненные ранее работы [2] показали, что общий объем эродированного материала наиболее крупными водотоками в среднем за период формирования голоценовых террас измеряется огромными объемами – 1200–2000 т/км²/год, и наиболее значительными притоками перемещается до 200–800 т/км²/год [2]. Эти величины позволяют определить средние значения эрозии постоянных водотоков в пересчете на всю характеризуемую территорию в интервале 10–70 т/км²/год, т. е. снижение высоты земной поверхности происходит на 0,02–0,03 мм/год. Полученные величины меньше установленной ранее денудации поверхности Беларуси – около 0,03–0,05 мм/год [2], но это естественно, так как поверхность Полесья является одной из наиболее пониженных и выровненных в стране.

В деятельности рек особо следует отметить катастрофические наводнения и паводки, при которых происходит резкий подъем уровней вод, подтопление населенных пунктов. Такие процессы особенно характерны для долин рек бассейна Припяти, в меньшей степени Западного Буга. Уровни вод нередко превышают меженные на 5–7 м, реже они являются более высокими. Продолжительность развития наводнений и паводков варьирует от нескольких недель до нескольких месяцев.

Во время катастрофических разливов чрезвычайно увеличиваются деструктивная (углубление русел, подмыв и обрушение коренных склонов, спрямление меандров) и конструктивная (отложение аллювиальных наносов на пойме, рост прирусловых валов) деятельности рек.

Эоловые процессы. По многообразию и концентрации эоловых форм район работ является одним из классических для умеренной гумидной зоны. Эоловые образования отмечаются почти повсеместно, превалируя на аллювиальных, озерно-аллювиальных и водоно-ледниковых равнинах. Занимаемая ими площадь составляет не менее 2 % территории региона. Широкое распространение форм эолового рельефа связано с провинциальными особенностями и историей его формирования, что определялось составом отложений, рельефом и особенностями климата. Определенную роль в развитии и активизации эоловых форм сыграл также антропогенный фактор.

При всем разнообразии эолового рельефа отмечается преобладание сложных линейных и серповидных форм, расположенных преимущественно по направлению главных орографических элементов, а также вдоль границ различных по генезису и возрасту элементов рельефа. Среди эоловых образований достаточно широко представлены и эмбриональные бугры, косы, песчаная рябь. В меньшей степени – котловины выдувания. Обычно они осложняют незакрепленные формы мезо- и макрорельефа, прирусловые валы и гривы пойменного рельефа, а также широко развиты близ населенных пунктов и участках проселочных дорог. Близ населенных пунктов и у дорог также широко развиты поля эмбриональных аккумуляций с мелкими котловинами выдувания. Особенно заметно возрастание числа эоловых форм на широтно ориентированных участках речных долин с незакрепленными или слабо закрепленными пойменными и террасовыми уступами, прирусловыми валами и гривами, где террасовые комплексы и русловой аллювий включаются в эоловую переработку. Увеличение скорости ветра за счет совпадения ориентировки долин и направления воздушного потока способствует усилинию перевевания (верховье Припяти, долина Припяти от устья Пины до устья Горыни, в низовьях Лани, в междуречье Днепра и Брагинки, в бассейне правых притоков Западного Буга).

Широкое распространение получили в регионе узкие линейные гряды длиной от первых сотен метров до 1–2 км при ширине 20–60 м. Чуть меньше распространены серповидные – с выпуклой восточной стороной. Обычно длина их по гребню составляет около 500 м, а ширина – 15–40 м. Высота гряд – 5–10 м. Поперечный профиль асимметричный. Крутизна наветренного склона достигает 6°–10°,

заветренного – 20°. Встречаются полукольцевые гряды с дефляционными мелкими котловинами, иногда занятymi озерками, чаще заболоченными, параболические дюны и береговые дюны. Последние отмечаются вдоль озер Белое, Бобровичское, Кончицкое и др. Эоловые приозерные аккумуляции часто бывают навеяны на цоколи береговых валов. Цокольные аккумуляции хорошо фиксируют древние береговые озерные линии. Многие отдельные хорошо выраженные формы эолового рельефа встречаются вдоль Ясельды в Дрогичинском, Ивановском и Пинском районах, в низовьях Лани, в левобережье Припяти в районе Мозыря, в междуречье Днепра и Брагинки и др. Крупные и весьма своеобразные массивы эолового рельефа выделены в районе д. Мошны Житковичского района и д. Белев западнее г. Паричи Светлогорского района Гомельской области.

Особо следует отметить протекающие на исследуемой территории процессы экстремальной дефляции (*пыльные бури*). В настоящее время интенсивной ветровой эрозии подвергаются участки осущенных торфяников, что связано с изменением уровня грунтовых вод. При пыльных бурях интенсивность процесса резко возрастает. Вынос грунтов достигает 20 т/га, а на отдельных участках – до 50–100 т/га и более [10]. Общий объем перемещаемого материала может измеряться несколькими миллионами тонн. Об интенсивности дефляционных процессов можно судить по наблюдениям на ключевых участках Каменецкого и Жабинковского районов Брестской области. Здесь северо-западный ветер силой до 30 м/сек, дувший с 25 по 28 марта 2012 г., способствовал перемещению с наветренных склонов слоя от 3 до 8 см. В реперных бороздах подветренного склона мощность аккумулированного материала измерялась от 2 до 10 см [4].

Вероятность возникновения интенсивной дефляции предопределется преобладанием распахиваемых почв песчаного и супесчаного состава и мелиорированных торфяников. Кроме того, для региона присущи самые сильные ветры, наибольшие колебания сумм осадков (300–1000 мм/год при среднем значении 600–650 мм/год), периоды без дождя длительностью до 15 сут, когда поверхностный слой пересыхает до полной потери воды [11]. Как следует из работы [12], пыльные бури происходят практически на всей территории Беларуси, однако вероятность их возникновения на территории Полесья определяется как очень высокая и высокая.

Гравитационные процессы наиболее активно проявляются на крутых склонах (более 10°–15°) речных долин, оврагов, балок, карьеров, отдельных холмов и гряд, отвалов горных пород. Самые крупные площади развития таких процессов приурочены Гомельской области: к Мозырской гряде, коренным склонам долины Припяти на участке от Петрикова до Хойников к низовьям Случи и Березины, долине Днепра от Жлобина до Лоева, к отдельным участкам долины Сожа и его притоков (Беседь, Ипуть), Птичи (от д. Рожанов Октябрьского района до г. п. Копаткевичи), обрывистым берегам Западного Буга, Горыни, Лесной, Мухавца и т. д.

Объем перемещенных пород варьирует от нескольких десятков до сотен кубических метров. Обычно объемы разового смещения материала редко превышают первые сотни кубических метров, но на наиболее крутых склонах речных долин могут достигать довольно значительных объемов. Так, на склоне долины Припяти в Петрикове в результате оползня образовалась псевдотерраса шириной 70–80 м, простирающаяся более чем на 100 м. На Днепре на отдельных участках отступание берега из-за обвалов и оползней достигает 3–5 м/год. Обрушение значительных масс песчано-гравийной смеси установлено в карьерах, расположенных возле деревень Миньковичи, Проходы, Кощеники, Дмитровичи Каменецкого района, карьерах на Мозырской гряде, в районе г. п. Микашевичи и др. Как правило, практически во всех карьерах у основания стенок имеются обвально-осыпные накопления. Оползни, обвалы и осыпи возникают как вслед за проходкой выработки, так и после эксплуатации нерекультивированных карьеров. Причина развития гравитационных движений – завышение крутизны углов откоса бортов выемок. Оползни, обвалы и осыпи активизируются после углубления карьеров, подрезки их бортов, перегрузки стенок карьера отвалами, весеннего снеготаяния и сильных дождей.

Суффозионно-карстовые процессы. Результатом проявления суффозии могут быть формы поверхности рельефа в виде просадок, западин, которые распространены в крайней южной части исследованной территории (южнее и юго-западнее Пинска) и на Мозырской возвышенности. В современном облике земной поверхности они выглядят в виде неглубоких (до 1 м) округлых заболоченных понижений диаметром в несколько десятков, реже сотен метров. Кроме того, суффозия в пределах Мозырской гряды проявляется в виде циркообразных ниш по бортам оврагов и балок, колодцев и туннелей в верховьях оврагов.

Что касается карста, то на территории Белорусского Полесья наиболее значительные его проявления выявлены в западной части, где сформировалась серия котловин, занятых Меднянскими, Луковским и другими озерами [13]. Глубина их изменяется от 5,5 до 11,5 м, а площадь от 0,24 до 3,5 км². Выделено также несколько карстовых котловин – озера Вулька и Сомино в Ивацевичском районе. Их глубина составляет 21,5–33,5 м, площадь – 0,4–0,5 км². Следует также отметить, что в Солигорском

районе отмечается развитие карста на отвалах соляных пород. Кроме того, в юго-западной части региона, на территориях, где меловые породы залегают не глубже 40 м, выделяются площади потенциального проявления карста.

Биогенные процессы. С учетом того что исследованная территория расположена в пределах низменности, биогенные процессы имеют широкое распространение и обусловливают формирование определенного типа отложений и некоторых форм рельефа. Биогенное осадконакопление происходит в озерах, где органогенные слои нередко переслаиваются с терригенными образованиями, и на болотных массивах. В остаточных застраивающих озерных котловинах Полесья (озера Выгоновское, Бобровичское, Черное, Споровское, Червоное и др.) в основном накапливаются сапропели, озерные мергели, тонкозернистые пески и тонкие супеси с прослойками торфа. Котловины этих озер на 30 % и более заилены. Мощность озерных осадков, преимущественно сапропелей, по разведанным и эксплуатируемым залежам (месторождения Корочин, Олтушское, Колдычевское и другие) в среднем составляет 3–7 м [14]. Котловины карстовых озер обычно заполнены осадками не более чем на 10–20 %. Средняя мощность озерных отложений в них обычно достигает не более 1,5–2,5 м. Учитывая, что формирование озерных осадков происходило в основном в голоцене, можно рассчитать среднюю скорость осадконакопления, которая не превышает 0,3–0,5 мм/год.

На значительной территории Полесья (20 %) распространены болота. Наиболее заметным фактором проявления здесь биогенных процессов является накопление торфа. Некоторое разнообразие природных условий отдельных территорий способствовало образованию неоднородных по своему строению болотных систем, отличающихся своими размерами, строением торфяной залежи. Наиболее широко развиты низинные мелковозалежные торфяники. На их долю приходится около 85 % площади всех болот. Мощность торфа варьирует от нескольких дециметров до 5–7 м, составляя в Полесье в среднем 1,7 м. Самые крупные болотные массивы занимают десятки тысяч гектаров: Паддубичи (Столинский район) – 48 тыс. га; Великий Лес (Кобринский и Дрогичинский районы) – 40,1; Выгонощанское (Ляховичский, Ивацевичский и Ганцевичский районы) – 43,0; Гричин (Лунинецкий и Солигорский районы) – 32,9; Погонянское болото (Брагинский и Хойникский районы) – 28,4; Хольча (Лунинецкий, Пинский и Столинский районы) – 25,6; Обровское (Ивацевичский, Березинский и Ивановский районы) – 22,9; Дикое (Пружанский и Свислочский районы) – 21,7 тыс. га и др. Средняя скорость накопления торфа за голоцен варьирует от 0,2 до 0,6 мм/год.

Большая часть болот исследованного региона в настоящее время мелиорирована, что сопровождается процессами деградации торфяных залежей и сокращением болотных площадей, а это резко стимулирует рост паводков.

Кроме широкого распространения биогенных отложений и слагаемых ими типов рельефа на территории Полесья выделяется довольно разнообразная сеть форм рельефа, возникших в результате деятельности живых организмов. В их число входят муравейники, кротовины, бобровые комплексы рельефа, гнездовые норы птиц, порои диких кабанов, тропы крупного рогатого скота и т. д. Чаще всего эти формы невелики по размерам, но на определенных участках придают своеобразный облик земной поверхности. К участкам проявления биогенных процессов относятся и заболоченные территории. Правда, собственно торфяники на них встречаются далеко не повсеместно, их мощность не превышает первых десятков метров. Однако на этих площадях достаточно высоко залегают грунтовые воды, формируются своеобразные формы земной поверхности и понижена устойчивость грунтов к нагрузкам.

ЭНДОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Несмотря на то что характеризуемая территория расположена в пределах древней платформы, современные эндогенные процессы проявляются здесь достаточно разнообразно и с определенными различиями по площади. Это обусловлено тем, что на территории Белорусского Полесья выделен ряд тектонических структур более низкого порядка, чем платформы имевших некоторые различия в развитии, что и сказалось на своеобразии проявления современных эндогенных геологических процессов. Наиболее характерно эта особенность заметна в распределении *сейсмичности региона*, максимальные значения которой тяготеют к восточной части Полесья (см. рис. 2), именно здесь за последние десятилетия зарегистрированы многие сотни сейсмических событий с балльностью до 3–5 [4]. В целом же по результатам анализа геологического строения в этой части Полесья выделен ряд сейсмогенных и потенциально сейсмогенных зон. В частности, южный участок Бобруйской потенциально сейсмогенной зоны и Северо-Припятская сейсмогенная зона (обе расположены примерно между Солигорском, Любани и Жлобином), сотрясаемость земной поверхности в их пределах может достигать 7 баллов [1]. В Центрально- и Южно-Припятских сейсмогенных зонах, занимающих большую часть региона восточнее Пинска – Столина, вероятность проявления сейсмических событий не превышает 6 баллов. В западной и в северо-восточной частях Полесья интенсивность описываемых процессов составляет не более 4–5 баллов.

Еще одним из распространенных видов эндогенных процессов является *современная активизация разрывных структур*, устанавливаемая по особенностям геологического строения, своеобразного рельефа, наличию геохимических аномалий. Всего выделено примерно 50 фрагментов активных разломов. Эти участки линейных структур в основном имеют длину 35–70 км, но единично достигают 100 км и более. Они ориентированы в восточной части Полесья в направлениях северо-запад – юго-восток – 30 %, субширотно – 29, субмеридионально – 11, с северо-востока на юго-запад – 30 %. В западной части преобладающим направлением является субширотное (около 55 %), на диагональные приходится 35 % и на субмеридиональные – около 10 %.

С активными разломами достаточно часто связаны и проявления *горизонтальных движений земной коры* [15]. По данным измерений на геодинамическом полигоне в районе Солигорска [16], их интенсивность составляет 20–40 мм/год (до 50 мм/год). Кроме разломов на исследованной территории представлена серия линейных нарушений с отдельными видами геодинамической активизации, которые дешифрируются по материалам снимков из Космоса и топокартам. Им чаще всего соответствуют зоны дробления пород, без заметных вертикальных смещений. Наиболее протяженные формы таких нарушений (токо- и космолинеаментов) в западной части имеют преимущественное простирание северо-запад – юго-восточное, реже субширотное, субмеридиональное и северо-восток – юго-западное, в восточной части ориентировка таких нарушений несколько иная: преобладают северо-восток – юго-западное и северо-запад – юго-восточное, а субширотная и субмеридиональная встречаются не более чем в 10–14 % соответственно.

Кроме геодинамических процессов, связанных с активизацией разрывных структур, территория Полесья на современном этапе повсеместно испытывает нисходящие *вертикальные современные движения земной коры* [17, 18]. Их скорости в основном варьируют от –2,8 мм/год (на границе с Украиной южнее Пинска) до 0,4–2,4 мм/год на остальной территории. В зонах активных разломов этот показатель может достигать 10–20 мм/год и более, причем направление перемещения земной поверхности меняется от года к году и чаще. Поднятия земной коры (до +0,3...+0,8 мм/год) зарегистрированы только на относительно небольшой площади, расположенной между городами Глуск – Паричи – Светлогорск – Октябрьский.

Из других современных эндогенных процессов следует отметить проявление в строении покровных отложений и рельефа (северо-восточнее Кобрина, севернее Пинска, в районе Мозыря, Октябрьского и др.) *серии кольцевых структур, активизированных на современном этапе*. Их диаметр варьирует от 7 до 40 км. С активными линейными разрывными структурами связано не только возрастание скоростей вертикальных и горизонтальных движений, но и формирование геофизических (гравитационные, магнитные, электрические) и геохимических аномалий (Pb, B, Ni, Cr, V и др.). В частности, в зонах разломов объемная активность радона в почвенном воздухе нередко достигает 50 000 Бк/м³, но в основном варьирует в интервале 20 000–40 000 Бк/м³ [19].

ТЕХНОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Деятельность человека на территории Белорусского Полесья привела к заметной трансформации природных комплексов. Наиболее характерные проявления в земной поверхности антропогенного воздействия показаны на рис. 1. В зависимости от направленности и некоторых других особенностей антропогенных геологических процессов они подразделяются на две большие группы: денудационные, формирующие чаще всего понижения рельефа, и аккумулятивные, создающие положительные формы и вызывающие загрязнение верхней части платформенного чехла. Территориально возможно сочетание обеих групп процессов на небольших площадях или их параллельное простиранье при вытянутых техногорахах. Интенсивность техногенных геологических процессов такова, что они могут создавать неровности земной поверхности или накапливать отложения, параметры которых не уступают, а иногда и превосходят сходные природные образования.

Денудационные техногенные геологические процессы активно проявляются при разработке полезных ископаемых, различных видах строительных работ и др. Воздействие на земную поверхность сопровождается формированием как удлиненных, так и близких к изометрическим форм. Среди первых преобладают мелиоративные и более крупные каналы, спрямленные русла рек. Эти образования по длине превосходят протяженность речной сети. Наиболее крупным из каналов является Днепровско-Бугский, который имеет общую длину 95 км, ширину от 22 до 28 м и глубину до 1,6 м. Канал включает искусственно проложенную часть протяженностью около 50 км и спрямленное русло Пины.

Из близких к изометрической форме техногенных денудационных образований необходимо отметить многочисленные карьеры по добыче различных полезных ископаемых (пески, глины, строительный камень, мел, торф) и котловины многочисленных водохранилищ и прудов, некоторые шламохранилища. Самым крупным карьером является Микашевичский (в Лунинецком районе) по добыче щебня. Его глубина – до 130 м, площадь – 6,8 км². Остальные подобные формы чаще всего не превышают в глубину 30–40 м (чаще до 20 м) и имеют площади, измеряемые первыми гектарами (десятками га),

но при разработке торфа площади добычи могут достигать 50 га, а глин – 63 га при глубинах от первых метров до 10 м.

Своеобразные денудационные образования сформировались на поверхности торфяников из-за понижения уровня грунтовых вод, что иногда приводит к иссушению торфяных залежей. В засушливые годы происходит самовозгорание торфа, что в конечном итоге способствует возникновению на поверхности пирогенных западин [4] диаметром до 120 м и глубиной от 2,0 до 3,5 м. Такие формы распространены на торфяных массивах Брагинского, Брестского, Калинковичского, Каменецкого и Малоритского районов.

Еще одним проявлением техногенной денудации на земной поверхности являются многочисленные просадки, возникшие в районе Солигорска, где на площади около 120 км² образовались понижения глубиной до 3,5–5,0 м. Весьма распространенной формой техногенных процессов являются котловины водохранилищ и прудов. Наиболее крупные из них имеют площадь до 1–3 км², единично – до 20,7 км² (Селец). Площадь всех искусственных водоемов составляет около 1,0 % поверхности региона, в то время как площадь естественных озер не превышает 0,3 %.

Аккумулятивные техногенные геологические процессы на территории Белорусского Полозерья также представлены достаточно разнообразно. Эти процессы сформировали различного вида насыпи, отвалы, свалки, вызвали загрязнение покровных отложений на некоторых площадях. Наиболее грандиозными из перечисленных сооружений являются насыпи автомобильных и железных дорог, высота которых составляет около 1 м, ширина – 6–28 м, а общая длина автодорог с твердым покрытием (они как раз и строятся на искусственных насыпях) несколько превышает 8000 км, при этом длина насыпей железных дорог достигает более 1600 км.

Своеобразное проявление аккумулятивных процессов привело к формированию свалок и отвалов горных пород. В Полесье создано не менее 30 относительно крупных полигонов бытовых и промышленных отходов. Их площади обычно не превышают 3–4 га (до 15 га в районе Гомеля), а высота составляет до 10 м, однако изредка достигает 55 м (район Гомеля). Кроме того, на характеризуемой территории возникло около 1000 малообустроенных миниполигонов бытовых отходов площадью до 1 га.

Весьма значительные объемы вскрышных отложений и пород складированы в районах добычи различных полезных ископаемых. Самые грандиозные из них расположены в Солигорском районе, где их высота достигает 120 м на площади около 10 км². Отвалы в районе Гомельского химического завода имеют высоту 60 м на площади более 1 км², отвалы в других районах добычи полезных ископаемых чаще всего не превышают 10–20 м и имеют относительно меньшую площадь.

Наконец, одним из неблагоприятных проявлений аккумулятивных техногенных процессов является загрязнение покровных отложений различными выбросами автотранспорта и предприятий, при размыве свалок и отвалов. Вдоль дорог шириной до 100 м сформировались повышенные в покровных отложениях концентрации Zr, Pb, Cu, Ti, Ni, Cr, V и других элементов [19], вокруг свалок увеличено содержание Ni, Cr, Mn, Ba, Zn, Pb, Cu [20], реже – радионуклидов, нефтепродуктов и др. Вблизи промышленных центров и бывших военных баз опасными являются загрязнения As, Ni, Cr, Mn, Zn, Pb, Cd, нефтепродуктами и др. [19].

В результате проявления всех перечисленных техногенных геологических процессов на территории Полесья перемещаются огромные объемы отложений. На некоторых участках, особенно активно преобразованных в процессе хозяйственной деятельности человека, природные комплексы оказались почти полностью разрушенными, и здесь сформировался типичный бэдленд (отдельные площади в Солигорском районе, вокруг Микашевичского карьера).

Менее интенсивные техногенные и другие классы современных геологических процессов также нередко неблагоприятно влияют на природные комплексы, хозяйственную деятельность и здоровье населения. Эти процессы могут снижать плодородие почв, разрушать лесные насаждения, постройки, сельскохозяйственные угодья, вызывать заилиение водоемов, быть причиной аварий и ряда заболеваний населения и т. д. [21].

Выводы.

1. Несмотря на расположение в пределах древней платформы и относительно выположенной низменности на территории Белорусского Полесья разнообразно проявляются современные геологические процессы экзогенного, эндогенного и техногенного классов.

2. Проявление современной геодинамики заметно варьирует по территории и может вызывать деформацию природных комплексов, ухудшать качество среды обитания и деятельности человека, наносить ущерб экономике государства.

3. Построенные схемы и выявленные особенности проявления современных геологических процессов могут быть использованы при обосновании строительства крупных промышленных объектов и схем рационального природопользования, разработке конкретных мероприятий по снижению последствий неблагоприятных проявлений отдельных видов современной геодинамики.

Список использованных источников

1. Сейсмотектоника Беларуси и Прибалтики / Р. Е. Айзберг [и др.] // Літасфера. – 1997. – № 7. – С. 5–18.
2. Современная динамика рельефа Белоруссии / А. В. Матвеев [и др.] ; под ред. Б. Н. Гурского, А. В. Матвеева. – Минск, 1991. – 102 с.
3. Инженерная геодинамика Беларуси / А. Н. Галкин [и др.] . – Витебск, 2017. – 452 с.
4. Гречаник, Н. Ф. Рельеф территории Подлясско-Брестской впадины / Н. Ф. Гречаник, А. В. Матвеев, М. А. Богдасаров. – Брест, 2013. – 154 с.
5. Матвеев, А. В. Современные геологические процессы на территории восточной части Белорусского Полесья / А. В. Матвеев // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 217–224.
6. Матвеев, А. В. Современная геодинамика территории юго-западной Беларуси / А. В. Матвеев, Е. А. Кухарик // Літасфера. – 2019. – № 2 (54). – С. 36–44.
7. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на Европейской территории СССР. – Л., 1979. – 62 с.
8. Павловский, А. И. Закономерности проявления эрозионных процессов на территории Беларуси / А. И. Павловский. – Минск, 1994. – 106 с.
9. Аронова, Т. И. Особенности проявления сейсмотектонических процессов на территории Беларуси / Т. И. Аронова // Літасфера. – 2006. – № 2 (25). – С. 103–110.
10. Ярошевич, Л. М. Экологические проблемы эрозии почв в Полесье / Л. М. Ярошевич, Ю. И. Кришталь // Проблемы Полесья. – Минск, 1991. – Вып. 14. – С.153–171.
11. Шкляр, А. Х. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве / А. Х. Шкляр. – Минск, 1973. – 430 с.
12. Чижиков, Ю. А. Районирование территории Беларуси по степени вероятности экстремального проявления ветровой эрозии / Ю. А. Чижиков // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 1999. – Т. 43, № 1. – С. 99–101.
13. Якушко, О. Ф. Проявление карстовых процессов и их палеогеографическая обусловленность в Белорусском Полесье / О. Ф. Якушко, Л. Б. Науменко // Новое в геологии антропогена Белоруссии. – Минск, 1979. – С. 125–130.
14. Курзо, Б. В. Сапропель / Б. В. Курзо // Полезные ископаемые Беларуси. – Минск, 2002. – С. 305–316.
15. Современные горизонтальные движения земной коры на территории Воложинского и Солигорского геодинамических полигонов (Беларусь) / А. В. Матвеев [и др.] // Літасфера. – 2002. – № 1 (16). – С. 113–117.
16. Матвеев, А. В. Особенности современных вертикальных движений земной коры на территории Беларуси / А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, Н. А. Шишонок // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 1998. – Т. 42, № 2. – С. 107–109.
17. Мацвеёў, А. В. Сучасныя вертыкальныя рухі. M 1 : 4 000 000 / А. В. Мацвеёў, Л. А. Нечыпарэнка // Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск, 2002. – С. 49.
18. Современная геодинамика и нефтегазоносность / под ред. Н. А. Крылова, В. А. Сидорова. – М., 1989. – 200 с.
19. Матвеев, А. В. Радон в геологических комплексах Беларуси / А. В. Матвеев, А. К. Карабанов, М. И. Автушко. – Минск, 2017. – 114 с.
20. Волкова, Н. П. Полигоны ТБО и ТПО как фактор дестабилизации природных комплексов / Н. П. Волкова, Л. Д. Лебедева // Современные проблемы геохимии. – Минск, 2002. – С. 49–52.
21. Матвеев, А. В. Последствия проявления опасных геологических процессов на территории Беларуси / А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко // Природопользование. – 2016. – Вып. 29. – С. 30–37.

References

1. Ajzberg R. E., Aronov A. G., Gareckij R. G., Karabanova A. K., Safronov O. N. Sejsmotektonika Belarusi i Pribaltiki [Seismotectonics of Belarus and the Baltic states]. Litasfera = Lithosphere, 1997, no. 7, pp. 5–18. (in Russian)
2. Matveev A. V. e. a. Sovremennaya dinamika rel'efa Belorussii [Modern dynamics of the relief of Belarus]. Ed. by B. N. Gursky, A. V. Matveyev. Minsk, 1991, 102 p. (in Russian)
3. Galkin A. N., Matveev A. V., Pavlovskij A. I., San'ko A. F. Inzhenernaya geodinamika Belarusi [Engineering geodynamics of Belarus]. Vitebsk, 2017, 452 p. (in Russian)
4. Grechanik N. F., Matveev A. V., Bogdasarov M. A. Rel'ef territorii Podlyassko-Brestskoj vpadiny [Relief of the territory of the Podlaska-Brest depression]. Brest, 2013, 154 p. (in Russian)
5. Matveev A. V. Sovremennye geologicheskie processy na territorii vostochnoj chasti Belorusskogo Poles'ya [Modern geological processes in the territory of the eastern part of the Belarusian Polesie]. Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 217–224. (in Russian)
6. Matveev A. V., Kuharik E. A. Sovremennaya geodinamika territorii yugo-zapadnoj Belarusi [Modern geodynamics of the territory of southwestern Belarus]. Litasfera = Lithosphere, 2019, no. 2 (54), pp. 36–44. (in Russian)
7. Instrukciya po opredeleniyu raschetnyh hidrologicheskikh harakteristik pri proektirovaniyu protivoerozionnyh meropriyatiy na Evropejskoj territorii SSSR [Instructions for determining the design hydrological characteristics in the design of anti-erosion measures on the European territory of the USSR]. Leningrad, 1979, 62 p. (in Russian)
8. Pavlovskij A. I. Zakonomernosti proyavleniya erozionnyh processov na territorii Belarusi [Patterns of the manifestation of erosion processes on the territory of Belarus]. Minsk, 1994, 106 p. (in Russian)
9. Aronova T. I. Osobennosti proyavleniya sejsmotektonicheskikh processov na territorii Belarusi [Peculiarities of manifestation of seismotectonic processes on the territory of Belarus]. Litasfera = Lithosphere, 2006, no. 2 (25), pp. 103–110. (in Russian)

10. Yaroshevich L. M., Krishtal' Yu. I. *Ekologicheskie problemy erozii pochv v Poles'e* [Ecological problems of soil erosion in Polesie]. *Problemy Poles'ya = Problems of Polesie*. Minsk, 1991, no. 14, pp.153–171. (in Russian)
11. Shklyar A. H. *Klimaticheskie resursy Belorussii i ispol'zovanie ih v sel'skom hozyajstve* [Climatic resources of Belarus and their use in agriculture]. Minsk, 1973, 430 p. (in Russian)
12. Chizhikov Yu. A. *Rajonirovanie territorii Belarusi po stepeni veroyatnosti ekstremal'nogo proyavleniya vetrovoj erozii* [Zoning of the territory of Belarus according to the degree of probability of extreme manifestation of wind erosion]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1999, vol. 43, no. 1, pp. 99–101. (in Russian)
13. Yakushko O. F., Naumenko L. B. *Proyavlenie karstovyh processov i ih paleogeograficheskaya obuslovленность в Belaruskom Poles'e* [Manifestation of karst processes and their paleogeographic conditionality in Belarusian Polesie]. *Novoe v geologii antropogena Belorussii = New in the geology of the anthropogen of Belarus*. Minsk, 1979, pp. 125–130. (in Russian)
14. Kurzo B. V. *Sapropel'* [Sapropel]. *Poleznye iskopаемые Belarusi = Minerals of Belarus*. Minsk, 2002, pp. 305–316. (in Russian)
15. Matveev A. V., Kovalev A. A., Nechiporenko L. A., Shishonok N. A., Kononovich S. I., Chiberkus Yu. N. *Sovremennye gorizontal'nye dvizheniya zemnoj kory na territorii Volozhinskogo i Soligorskogo geodinamicheskikh poligonov (Belarus')* [Modern horizontal movements of the earth's crust on the territory of the Volozhin and Soligorsk geodynamic polygons (Belarus)]. *Litasfera = Lithosphere*, 2002, no. 1 (16), pp. 113–117. (in Russian)
16. Matveev A. V., Nechiporenko L. A., Shishonok N. A. *Osobennosti sovremennoj vertikal'nyh dvizhenij zemnoj kory na territorii Belarusi* [Features of modern vertical movements of the earth's crust on the territory of Belarus]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1998, vol. 42, no. 2, pp. 107–109. (in Russian)
17. Matsveeu A. V., Nechyporenka L. A. *Suchasnyya vertykal'nyya ruhi* [Modern vertical movements]. Scale 1 : 4 000 000. *Natsyyanal'ny atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, 2002, p. 49. (in Belarusian)
18. Sovremennaya geodinamika i neftegazonosnost' [Modern geodynamics and oil and gas potential]. Ed. by N. A. Krylov, V. A. Sidorov. Moskva, 1989, 200 p. (in Russian)
19. Matveev A. V., Karabanov A. K., Avtushko M. I. *Radon v geologicheskikh kompleksah Belarusi* [Radon in the geological complexes of Belarus]. Minsk, 2017, 114 p. (in Russian)
20. Volkova N. P., Lebedeva L. D. *Poligony TBO i TPO kak faktor destabilizacii prirodnih kompleksov* [Solid waste and solid waste landfills as a factor in the destabilization of natural complexes]. *Sovremennye problemy geohimii = Modern problems of geochemistry*. Minsk, 2002, pp. 49–52. (in Russian)
21. Matveev A. V., Nechiporenko L. A. *Posledstviya proyavleniya opasnyh geologicheskikh processov na territorii Belarusi* [Consequences of the manifestation of dangerous geological processes on the territory of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2016, no. 29, pp. 30–37. (in Russian)

Информация об авторе

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

Information about the author

Aleksey V. Matveyev – 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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-135-150>

УДК 504.062.2:553.041

Поступила в редакцию 07.02.2023

Received 07.02.2023

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ НЕРУДНОГО СЫРЬЯ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

А. Н. Маевская¹, М. А. Богдасаров^{1, 2}, Н. Н. Шешко²

¹*Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь;*

²*Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь*

Аннотация. В статье на основе анализа работ, посвященных вопросу обоснования ввода в разработку общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) предложен подход к классификации по приемлемости освоения наиболее значимых с точки зрения мощности и представительных в площадном отношении залежей нерудного сырья территории Брестской области, установленных в результате цифрового геолого-генетического моделирования кайнозойской толщи региона. Предложенный подход базируется на использовании критерия «категория земельного участка», позволяющего оценить возможность введения залежей в освоение с учетом специфики территории, к которой они приурочены, а также критериев, отражающих некоторые геолого-промышленные параметры залежей (мощность пород и вскрышных отложений над ними, коэффициент вскрыши). Процедура классификации ресурсов ОПИ на основе предложенного метода реализуется в автоматическом режиме путем комплексирования набора растровых покрытий с формированием итоговых картографических классификационных схем двух видов: одни отражают приемлемость ввода всех выделенных в ходе моделирования контуров залежей конкретного вида сырья в освоение, а другие – очередность освоения участков одной определенной залежи, планируемой для использования. Залежи на сформированных картах ранжированы в виде пяти классов: (1) наиболее приемлемые для освоения, (2) приемлемые для освоения, (3) освоение которых допускается при наличии острого спроса на сырье, (4) освоение которых крайне нежелательно, (5) освоение которых невозможно. Предложенный подход может рассматриваться как вариант экспресс-оценки, позволяющей отсеивать малоперспективные с точки зрения освоения ресурсы ОПИ на предварительном этапе работ по планированию их ввода в разработку.

Ключевые слова: Брестская область; общераспространенные полезные ископаемые; земельный фонд; рациональное использование; цифровые карты.

Для цитирования. Маевская А. Н., Богдасаров М. А., Шешко Н. Н. Обоснование схем рационального использования залежей нерудного сырья Брестской области // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 135–150.

SUBSTANTIATE OF SCHEMES FOR THE RATIONAL USE OF DEPOSITS OF NON-METALLIC MINERALS OF THE BREST REGION

A. N. Mayevskaya¹, M. A. Bahdasarau^{1, 2}, N. N. Sheshko²

¹*Brest State A. S. Pushkin University, Brest, Belarus;*

²*Brest State Technical University, Brest, Belarus*

Abstract. The article presents an analysis of works dedicated to feasibility of bringing into development commonly occurring mineral resources (COMR) and suggests an approach for classifying, on the basis of development acceptability, the most significant deposits of non-metallic minerals of the territory of the Brest region in terms of thickness and area, which were discovered using numerical geological-genetic modelling of the Cenozoic strata of the region. The proposed approach is based on the use of “land plot category” criterion, allowing for an assessment of the feasibility of introducing deposits into development, taking into account the specific nature of the area to which they are attached, as well as criteria reflecting certain geological and industrial parameters of the deposits (thickness of rocks and overburden, overburden ratio). The procedure for COMR classification on the basis of the proposed approach is implemented automatically by integrating raster scans with subsequent generation of final cartographical classification schemes of two types: the one reflects the acceptability of introducing all the deposit outlines of a particular mineral identified during modelling and the other – the order of development of one particular deposit to be exploited. The deposits on the generated schematic maps are ranked in five categories: (1) most acceptable for development; (2) acceptable for development; (3) acceptable for development in the presence of sharp demand; (4) whose development is highly undesirable; (5) whose development is impossible. The proposed approach can be regarded as a rapid assessment option to screen out the COMR, whose development is unfeasible, in the early planning stage of development.

Keywords: Brest region; common minerals; land fund; rational use; digital maps.

For citation. Mayevskaya A. N., Bahdasarau M. A., Sheshko N. N. Substantiate of schemes for the rational use of deposits of non-metallic minerals of the Brest region. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 135–150.

Введение. Результаты анализа специализированной научной литературы показали, что при обосновании целесообразности проектов разработки полезных ископаемых разных видов применяются многообразные экономические подходы (сравнительный, затратный, доходный, опционный, метод применения натуральных показателей и др.) и критерии [1–5]. При этом в ряде работ, посвященных методическим аспектам оценки ресурсов нерудного сырья, наряду с классическими методами оценивания применяются также критерии, позволяющие учитывать специфические особенности территории размещения оцениваемого вида ресурсов [6–8]. В некоторых методических подходах такие критерии являются основополагающими. Применение подобных критериев в практике геологических оценок общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) является весьма оправданным, ввиду того что добыча нерудных полезных ископаемых зачастую сопряжена с негативным воздействием на компоненты окружающей среды. Это оказывает значительное влияние на величину вложений в освоение залежей, из-за необходимости последующего возмещения ущерба, прежде всего связанного с использованием и деградацией различных категорий земель.

Диапазон значений критериев, основанных на учете статуса земель, определяется преимущественно экспертным путем, что обуславливает определенную степень субъективности оценок, связанных с личным видением экспертов. В то же время сопоставление результатов, полученных при их использовании, с выводами, базирующимися на оценках с учетом показателей коммерческой эффективности, показывает адекватность полученных на основе применения таких критериев заключений.

Таким образом, на настоящем этапе один из актуальных подходов обоснования схем «рационального» освоения залежей нерудного сырья базируется на критериях, связанных со спецификой территории размещения залежей. Возможность применения такого подхода и рассматривается авторами в настоящей статье по отношению к оценке приемлемости освоения потенциальных залежей ОПИ территории Брестской области. Ввиду того что добыча местных видов сырья в регионе производится в основном путем разработки внутрихозяйственных карьеров, в результате чего нарушенные земли крайне проблематично в дальнейшем вовлечь в хозяйственный оборот, для нее применение такого подхода является особенно актуальным.

Методы и данные. Исходными данными для обоснования схем «рационального» использования ресурсов нерудного сырья Брестской области послужили:

1) цифровая растровая модель, отражающая приемлемость различных видов земель Брестской области к освоению ОПИ. С методикой ее создания более подробно можно ознакомиться в ранее опубликованной авторами работе «Ранжирование земельного фонда административных районов Брестской области по приемлемости к освоению залежей строительного сырья» [9];

2) набор цифровых растровых моделей, отражающих сведения о площадях распространения местных видов сырья, их мощностях и мощностях перекрывающих пород над ними (сформированы в результате геолого-генетического моделирования кайнозойских отложений региона на основе данных бурения территории с применением информационных технологий).

Процедура создания комплекта карт, показывающих приемлемость ввода залежей ОПИ исследуемого региона в освоение, была реализована на основе метода комплексирования информации в программной среде ArcGIS 10.5 с использованием инструмента Raster Calculator. В растровом калькуляторе первоначально рассчитывался линейный коэффициент вскрыши по каждой залежи (отношение мощности вскрытых пород к мощности продуктивной толщи). Затем выполнялось умножение сформированного растра частного на весовой растр земель.

В результате был составлен набор грид-моделей по наиболее представительным с точки зрения площадного распространения типам пород: пескам, валунно-гравийно-песчаным породам, глинам, суглинкам и супесям, торфу.

Принимая во внимание тот факт, что структура земель в границах каждой залежи являлась неоднородной, в полученном наборе растров области распространения пород разбивались на более мелкие участки. Это приводило к усложнению чтения итоговых растров и, как следствие, установления очередности освоения залежей ОПИ исследуемого региона. Решением возникшей проблемы стало создание комплектов карт двух типов.

Во-первых, был создан набор карт, дающих целостное представление о приемлемости разработки выявленных нерудных видов сырья области. Такой комплект карт является базовым и может быть важен для использования органами государственного управления в качестве информационной основы при определении перспектив и рациональной очередности освоения залежей ОПИ региона.

Для автоматизации отдельных этапов его построения в ModelBuilder ГИС ArcGIS был разработан инструмент «Классификация залежей по рациональному использованию» (рис. 1), извлекающий по контурам каждой залежи среднее вычисленное в ходе пересечения растров значение и группирующий полученные результаты в виде пяти классов:

- Класс 1. Залежи, наиболее приемлемые для освоения.
 - Класс 2. Залежи, приемлемые для освоения.
 - Класс 3. Залежи, освоение которых допускается при наличии острого спроса на сырье.
 - Класс 4. Залежи, освоение которых крайне нежелательно.
 - Класс 5. Залежи, освоение которых невозможно.

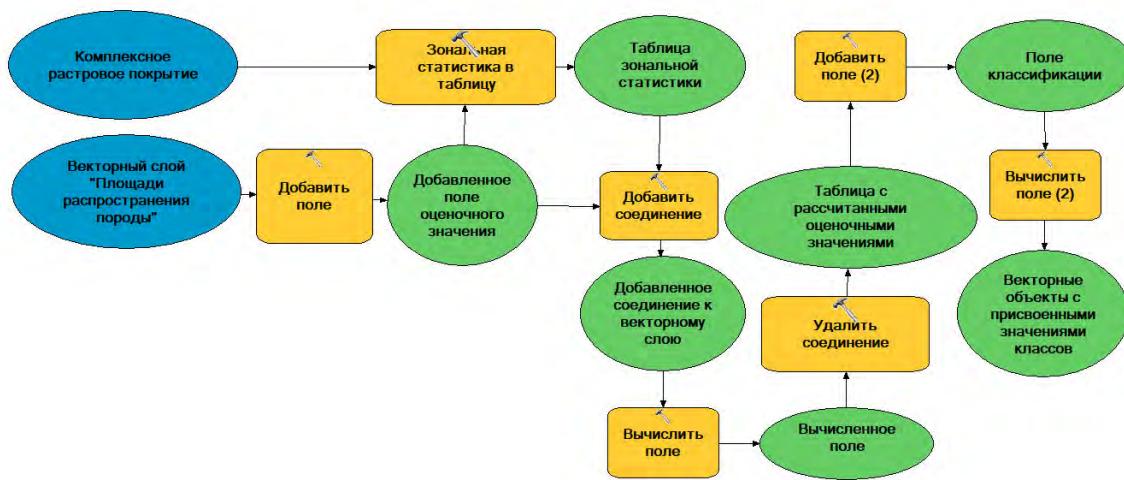


Рис. 1. Схема инструмента «Классификация залежей по рациональному использованию»

Fig. 1. Diagram of "Deposit Classification by Rational Use" tool

При этом для обеспечения возможности присвоения разработанной классификации полигональным слоям в ходе вычисления поля «Классы залежей» в предложенном инструменте прописывали следующий код:

```
breaks = [0.25, 0.54, 1.16, 2.54, 4.50]
def Get_Class(x):
    for i, v in enumerate(breaks):
        if v >= x: break
    return i+1,
```

где значения *breaks* указывают разрывы сводных показателей, по которым производили деление полигонов на классы. Стоит отметить, что разрывы определяли для каждой литологической разности в отдельности экспертным путем исходя из полученных комплексных по каждому типу пород показателей, учитывающих характеристики мощностей продуктивных толщ залежей и мощностей вскрышных пород над ними, а также усредненный вес групп земель, попадающих в их границы.

Во-вторых, был сформирован набор картографических материалов, дающих детальное представление о специфике каждой отдельной залежи. Это может быть актуально при обосновании целесообразности разработки конкретного объекта недропользования, выработке стратегии его освоения потенциальными землепользователями.

Формирование таких карт не требовало проведения процедуры осреднения результатов комплексирования по каждой залежи, что тем самым позволяло получить более точные сведения о возможности ее разработки с учетом специфики территории размещения.

Для автоматизации процедуры построения рассматриваемого комплекта в ModelBuilder ГИС ArcGIS был создан инструмент «Классификация залежи по возможности освоения». При этом группировку участков залежи в классы проводили способом, аналогичным тому, который использовали при создании общих региональных схем.

Результаты и их обсуждение. Полезные ископаемые Брестской области представлены мелом, песками строительными, стекольными и формовочными, песчано-гравийной смесью, глинами кирпич-

ными и цементными, камнем строительным, каолином, торфом, горючими сланцами, бурым углем, янтарем, пресными и минеральными подземными водами. Несмотря на то что имеющиеся запасы ОПИ региона в настоящее время обеспечивают запросы различных отраслей хозяйства, потребности в ряде из них будут постоянно расти. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость постоянного наращивания их запасов, а также разработки схем рационального введения перспективных залежей в эксплуатацию.

В качестве примера на рис. 2 приведена подобная схема, отражающая приемлемость разработки одной из залежей песчано-гравийных пород, выделенной авторами в ходе проведенного исследования. Представленная карта выполнена для залежи общей площадью 142,2 км², расположенной на границе нескольких районов – Каменецкого, Пружанского Кобринского и Жабинковского, и отнесенной в соответствии с общей региональной схемой к классу залежей, приемлемых для освоения.

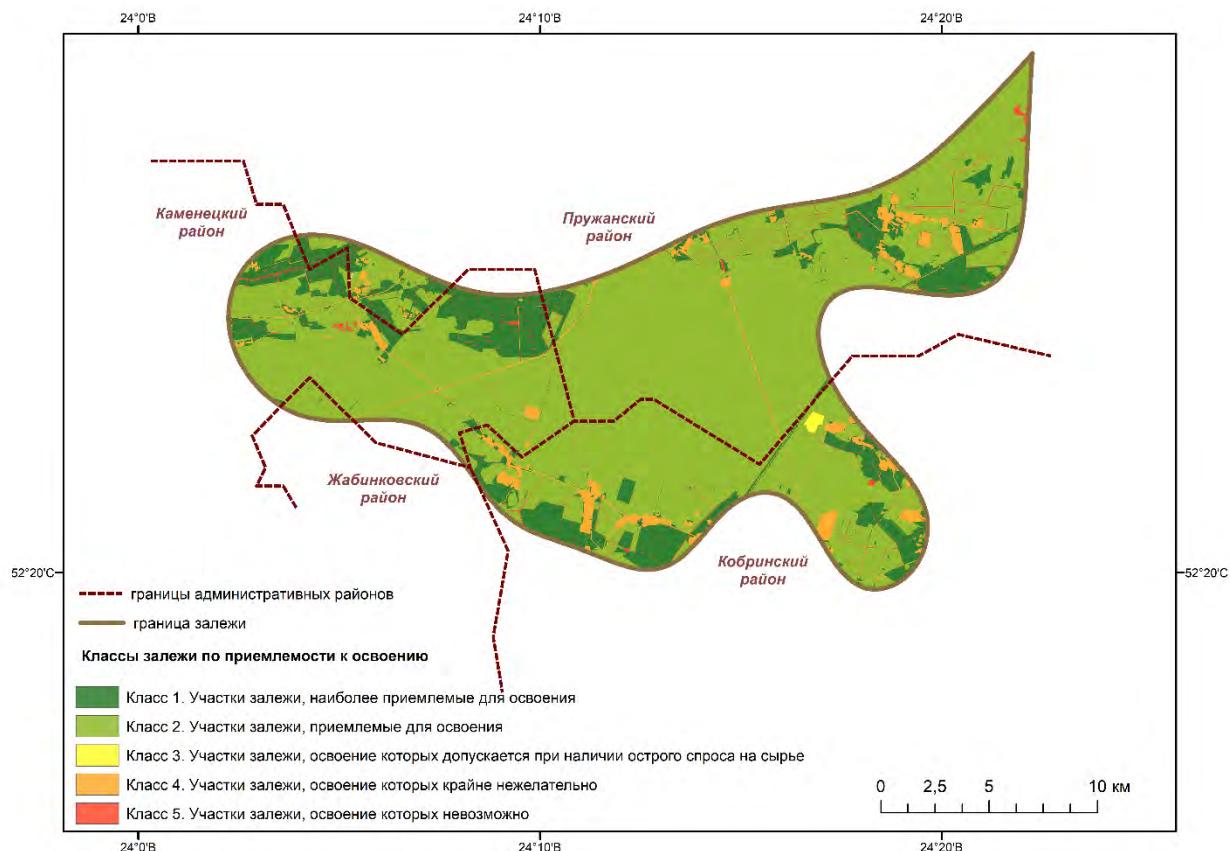


Рис. 2. Карта, отражающая приемлемость освоения отдельной залежи песчано-гравийных пород

Fig. 2. Map reflecting the acceptability of developing a separate deposit of sand-gravel rocks

Как видно из представленного рисунка, большая площадь рассматриваемой залежи приурочена к землям, приемлемым и наиболее приемлемым для освоения. Небольшой по площади ее участок относится к классу проблематичных для освоения земель ввиду того, что он расположен под действующей стройплощадкой. Невозможными для освоения являются участки залежи, расположенные под водотоками и небольшими водоемами. Неприемлемыми для отработки – участки под дорогами и застройкой.

Стоит подчеркнуть, что отображенная на рис. 2 карта в настоящей работе приводится лишь в качестве демонстрационного примера, показывающего осуществимость более детального анализа потенциальных залежей на основе предлагаемой методики. Выбор в качестве показательного примера вышеприведенной залежи обусловлен следующими причинами: трансграничное расположение, средние характеристики площади участка (в сравнении с площадями иных выявленных залежей ОПИ), типичная для данного класса структура земель под залежью.

Для рассмотрения вопроса о принципиальной возможности и очередности освоения выделенных в ходе геологического моделирования кайнозойской толщи площадей нерудного сы-

рья использовали базовый комплект карт. Именно он дает комплексное представление о районировании по рациональному использованию минерально-сырьевой базы территории всего исследуемого региона. Ниже, на основе анализа сформированных картографических схем, а также привязанных к ним баз данных предложена «рациональная последовательность» вовлечения залежей местных видов сырья Брестской области в освоение.

Пески. Преимущественная часть выявленных залежей песка относится к классу проблематичных для освоения. Суммарная их площадь составляет 12 228,2 км², или 38,8 % от общей площади залежей данного вида пород (табл. 1). Сконцентрированы они в основном на востоке Брестской области, а также на территории Пружанского и Берёзовского районов (рис. 3). Несмотря на значимые мощности (20 м и более) для них характерны и сходные значения мощностей вскрытых пород, т. е. коэффициент вскрыши большинства площадей равен единице. Ввиду того что отдельные залежи рассматриваемого класса характеризуются весьма обширными площадями, структура земель в их границах крайне мозаична и представлена сочетанием разных подтипов, суммарный вес которых и определил отнесение их к классу 3.

Таблица 1. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей песков в разрезе классов приемлемости к освоению

Table 1. Information about the area characteristics of potential sand deposits by development acceptability class

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	187	6354,7	20,1
2	133	5709,3	18,1
3	98	12 228,2	38,8
4	55	2655,5	8,4
5	19	4601,6	14,6

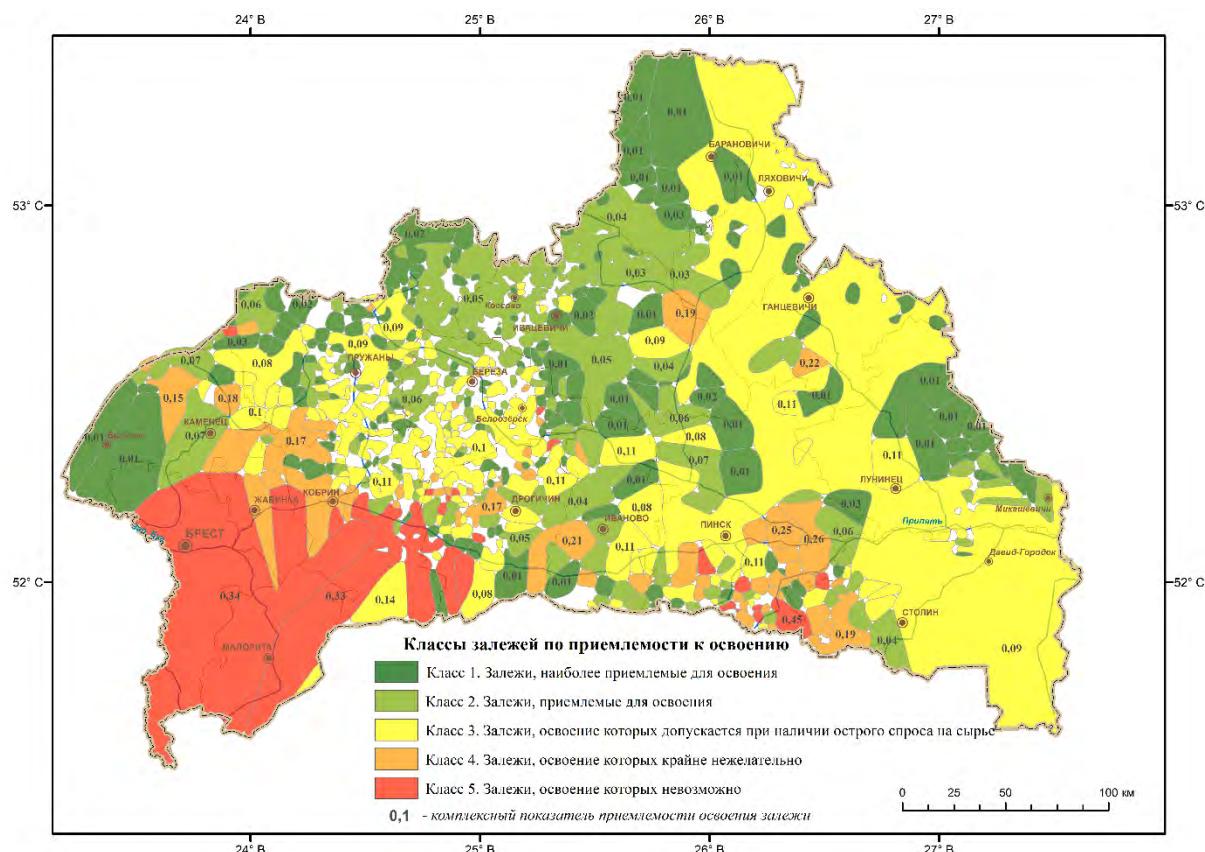


Рис. 3. Карта залежей песков по перспективности освоения

Fig. 3. Map of sand deposits by development potential

Наиболее приемлемыми и приемлемыми с точки зрения освоения являются 20,1 и 18,1 % залежей песка соответственно. Они характеризуются превалированием значения мощностей продуктивной толщи над перекрывающими отложениями, приуроченностью к землям, в границах которых не действуют специальные запреты на добычу полезных ископаемых (преимущественно к неиспользуемым землям, лесным и сельскохозяйственным землям с низкой интенсивностью землепользования).

Нежелательными для отработки песка являются залежи, расположенные преимущественно под жилой застройкой на территории Пинского, Ивановского, Дрогичинского, Ивацевичского, Жабинковского, Кобринского и Пружанского районов общей площадью 2655,5 км² и характеризующиеся преобладанием мощностей вскрышных пород над мощностями продуктивной толщи.

Нереальными для отработки на данном этапе являются 14,6 % песчаных пород, большая часть которых размещается на юго-западе Брестской области под населенными пунктами, водными объектами и болотами. Такие залежи характеризуются значимой мощностью вскрышных пород (более 50 м), которая практически в 3 раза превышает значения мощности песчаных пород и значительно выше принятых минимальных рентабельных характеристик, установленных в производственной практике по данному виду сырья [10].

Отдельно в данной группе ОПИ стоит выделить залежи песчаных пород с прослойками глины. На основании проведенной классификации по целесообразности и возможности отработки рассматриваются породы (рис. 4) очередность их введения в разработку может быть выстроена следующим образом.

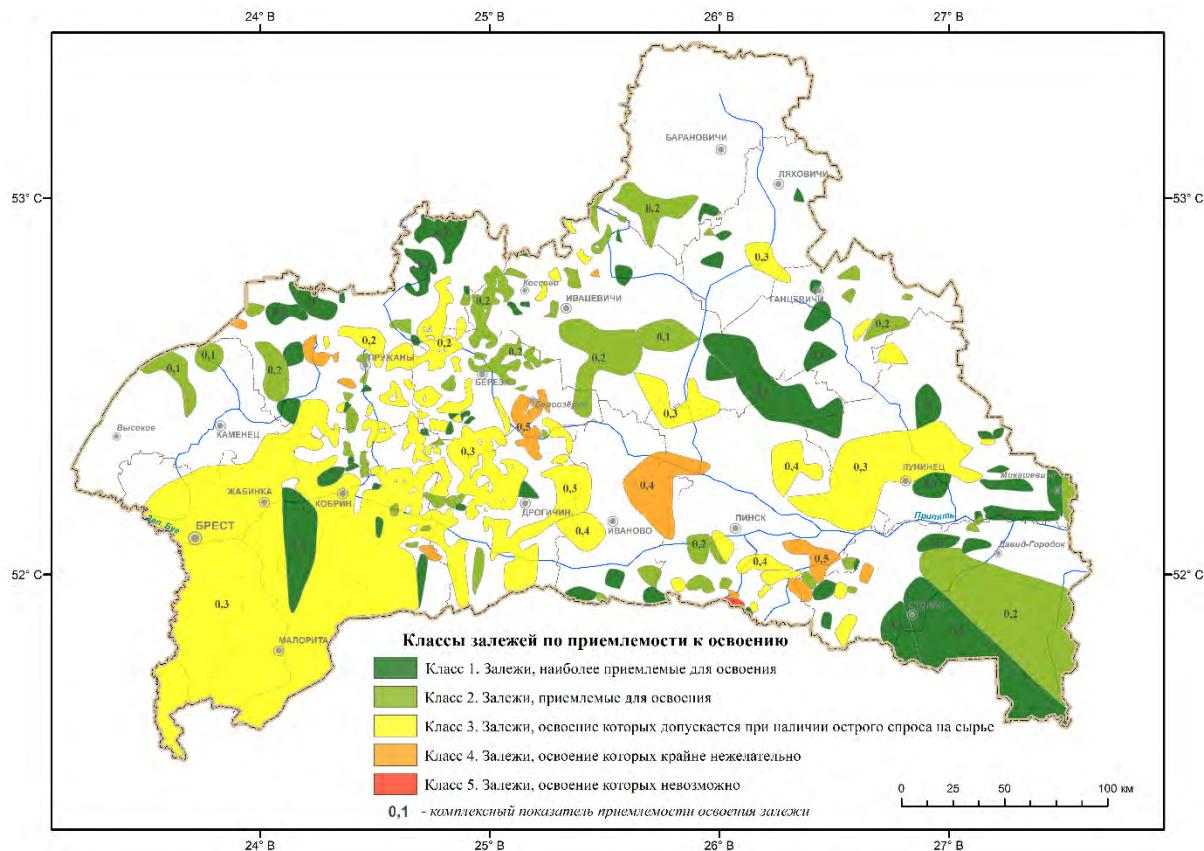


Рис. 4. Карта залежей песчаных пород с прослойками глины по перспективности освоения

Fig. 4. Map of sandy rocks deposits with clay interlayers by development potential

В качестве первичной для разработки базы может быть рассмотрено 40,5 % участков (табл. 2) данного вида пород, относящихся к классам наиболее приемлемых и приемлемых для освоения залежей. Большая их часть характеризуется относительно небольшими глубинами залегания при значимых показателях мощности. При этом отдельные залежи на территории Пружанского и Ивацевичского районов залегают непосредственно у земной поверхности. Благоприятны они для освоения и тем, что большей своей площадью приурочены к границам неиспользуемых и малоиспользуемых земель.

При возникновении острого спроса на сырье в качестве вторичной базы могут представлять интерес 54,7 % площадей рассматриваемых залежей. Проблематичность освоения таких участков связана прежде всего с трудностями в получении отвода залегающих над ними земель для разработки карьеров, преобладанием в 2 раза значений мощности перекрывающих отложений над мощностями продуктивных толщ.

Таблица 2. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей песчаных пород с прослойками глины в разрезе классов приемлемости к освоению

Table 2. Information about the area characteristics of potential sandy rocks deposits with clay interlayers by development acceptability class

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	61	2990,5	20,8
2	53	2836,3	19,7
3	35	7887,1	54,7
4	11	680,3	4,7
5	1	10,2	0,1

Валунно-гравийно-песчаные породы (песчано-гравийно-валунные породы). Прежде чем перейти к обоснованию возможностей освоения залежей данной группы, прежде всего рассмотрим песчано-гравийные породы (рис. 5). Среди них к числу участков, эксплуатация которых является на настоящем этапе невозможной, относятся девять ареалов (табл. 3). Лимитирует возможность их освоения в первую очередь тот факт, что большей своей площадью они приурочены к землям, занятых водными объектами и их гидротехническими сооружениями. Такие объекты с учетом действующего законодательства являются недоступными для получения земельного отвода под разработку. На долю рассматриваемых залежей приходится 2,1 % от общей площади, занимаемой песчано-гравийными породами. Сконцентрированы они в виде небольших участков на территории Пружанского, Пинского, Кобринского и Берёзовского районов.

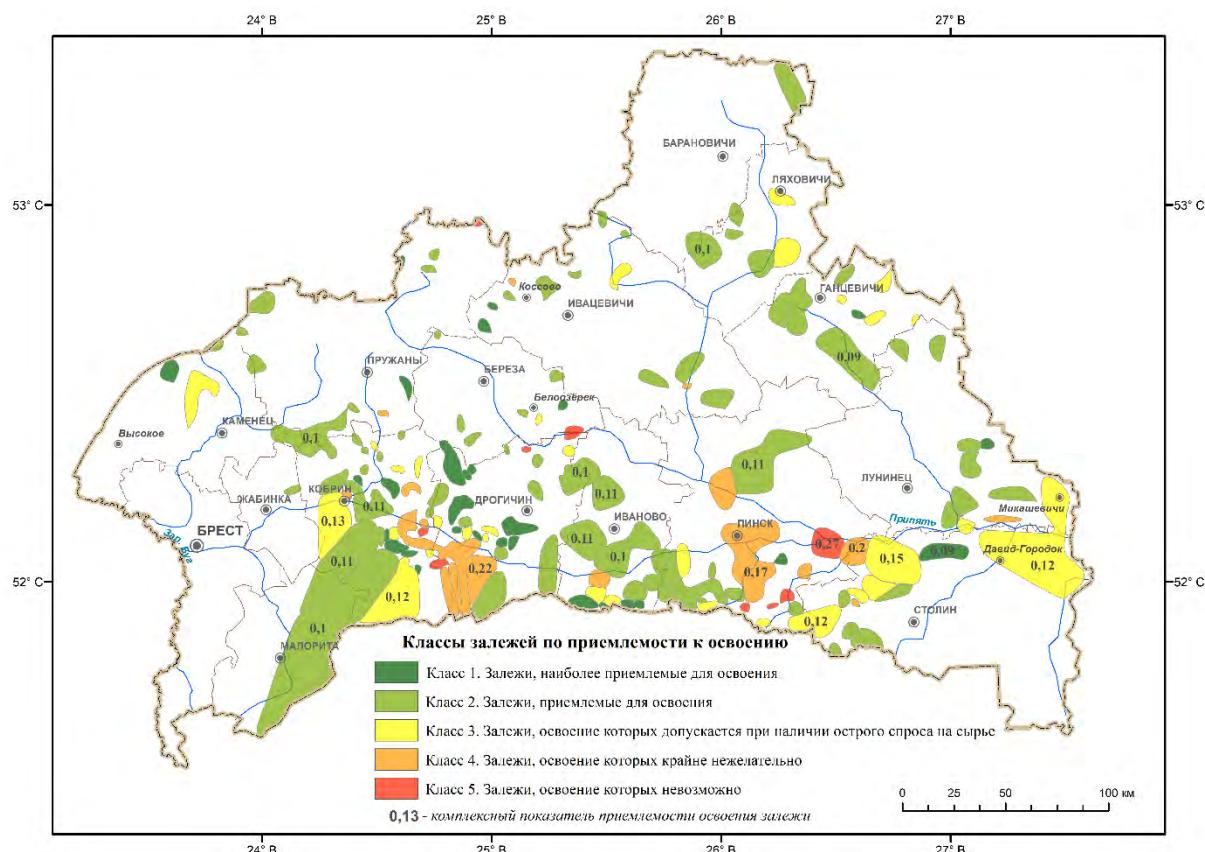


Таблица 3. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей песчано-гравийных пород в разрезе классов приемлемости к освоению**Table 3. Information about the area characteristics of potential sand-gravel rocks deposits by development acceptability class**

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	29	439,2	6,6
2	76	3731,0	55,6
3	32	1593,7	23,8
4	17	801,3	11,9
5	9	143,9	2,1

Крайне нежелательными для отработки являются 17 залежей песчано-гравийных пород общей площадью 801,3 км². Указанные залежи главным образом находятся в границах земель под застройкой, при этом их изъятие в целях государственных нужд (в том числе и для разработки полезных ископаемых) допускается в исключительных случаях с возмещением убытка от изъятия их владельцам.

Проблематичными для освоения являются 23,8 % залежей песчано-гравийных пород, наибольшие площади которых приурочены к территории Столинского и Кобринского районов. В основном это залежи мощностью от 20 м, расположенные под сочетающимися землями нескольких подтипов – неиспользуемыми, занятymi лесными насаждениями, древесно-кустарниковой растительностью, жилой застройкой и водными объектами.

Наиболее приемлемый и приемлемый для отработки фонд песчано-гравийных пород составляет 4170,2 км², или 62,2 % от общей площади рассматриваемых запасов данного вида сырья по Брестской области. В эти классы прежде всего входят залежи, тяготеющие к неиспользуемым землям, а также лесным и сельскохозяйственным землям с малой интенсивностью землепользования, характеризующиеся вскрышным коэффициентом менее единицы.

Ниже представлена схема рационального ввода в разработку валунно-галечных и песчано-гравийно-галечных пород. Исходя из анализа рис. 6 видно, что наибольшие площади данных пород относятся к классу наиболее приемлемых (64,4 %) и приемлемых (26,2 %) для освоения. Средняя мощность таких залежей составляет 15–20 м, достигая на отдельных участках и больших значений – 49 м. Глубины залегания большинства из них при этом не превышают отметки 10 м, а на территории Пинского, Каменецкого и Столинского районов песчано-гравийно-галечные породы находятся непосредственно у земной поверхности. Положительным с точки зрения освоения является и тот факт, что наибольшей своей площадью такие участки приурочены к неиспользуемым землям, а также сельскохозяйственным и лесным землям с низкой и высокой интенсивностью использования.

Наименьший удельный вес (табл. 4) характерен для объектов ресурсного потенциала валунно-галечных и песчано-гравийно-галечных пород, отнесенных к классам 3–5. На долю залежей, освоение которых проблематично и освоение которых невозможно, приходится по 2,7 % на каждый. Нежелательными для освоения при этом являются 4,0 % площадей рассматриваемого вида сырья. Участки залегания пород классов 4 и 5 характеризуются наименее благоприятными для освоения условиями ввиду значимой глубины залегания ресурсов (более 100 м) и приуроченностью к землям, в границах которых разработка карьеров недопустима или нежелательна. В качестве резервных могут выступать четыре залежи на территории Столинского и Пинского районов, характеризующиеся относительно невысоким вскрышным коэффициентом – 1,5.

Таблица 4. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей валунно-галечных и песчано-гравийно-галечных пород в разрезе классов приемлемости к освоению**Table 4. Information about the area characteristics of potential boulder-pebble and sand-gravel-pebble rocks deposits by development acceptability class**

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	9	897,8	64,4
2	10	365,0	26,2
3	4	37,5	2,7
4	3	55,1	4,0
5	1	38,1	2,7

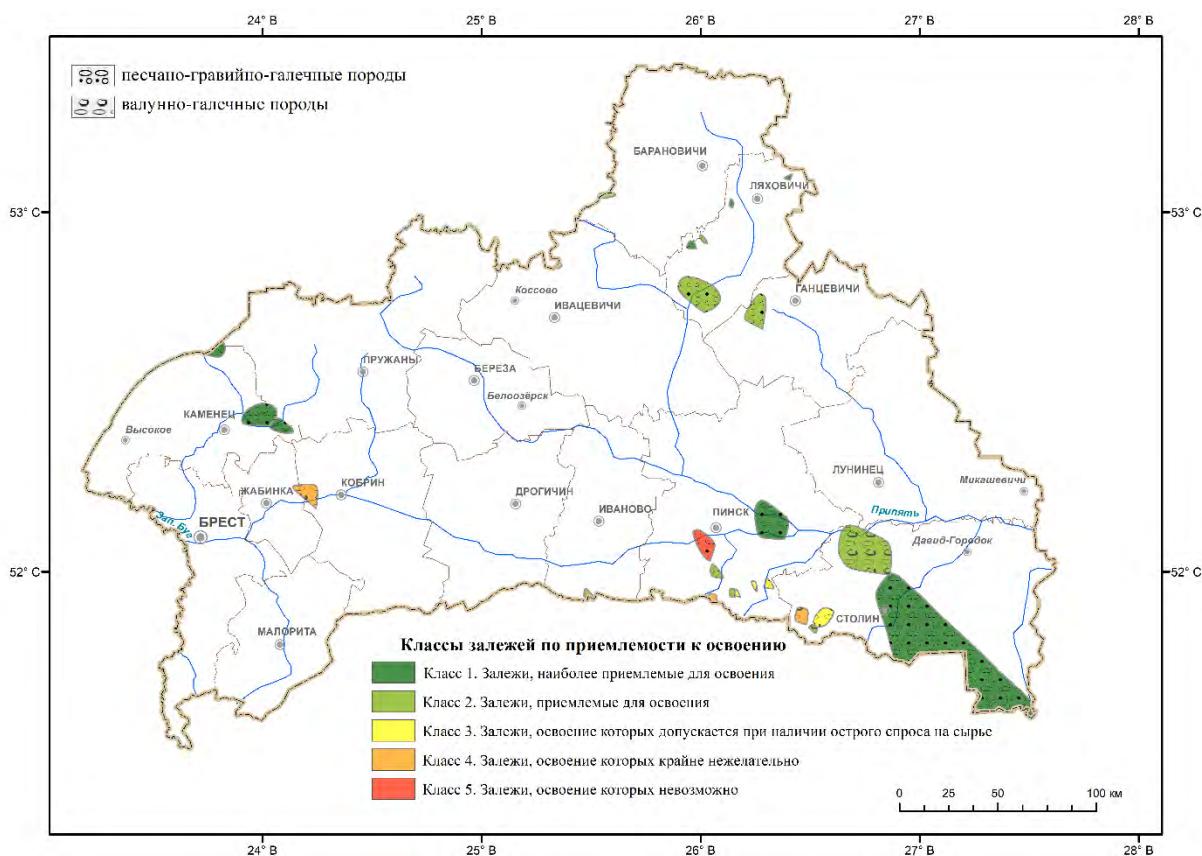


Рис. 6. Карта залежей валунно-галечных и песчано-гравийно-галечных пород по перспективности освоения

Fig. 6. Map of boulder-pebble and sand-gravel-pebble rocks deposits by development potential

Глина, суглинок, супесь. Среди глинистых пород в зависимости от содержания в них составных глинистых, пылеватых и песчаных частиц выделяют глины, суглиники и супеси соответственно [11].

Приступая к обоснованию перспектив введения в отработку данной группы залежей, рассмотрим в первую очередь глины (рис. 7). Первостепенными с точки зрения возможности освоения являются залежи (31 участок), расположенные под землями, изъятие которых для разработки карьеров наименее затруднительно (под неосвоенными, утратившими свои полезные свойства землями, а также землями, не покрытыми лесом и сельскохозяйственными землями, не используемыми для выращивания сельскохозяйственных культур). На их долю приходится 15,5 % (табл. 5) от общей площади распространения глин. Они характеризуются невысокими значениями вскрышного коэффициента, т. е. мощность отложений превалирует над мощностью перекрывающих пород. Территориально такие залежи приурочены к границам Ивацевичского, Пинского и Пружанского районов.

Приемлемый для отработки фонд глин составляет 41,7 %. Большинство залежей, отнесенных к рассматриваемому классу, характеризуется мощностями 8–15 м. При этом значение мощности самой крупной в площадном отношении залежи, расположенной на территории Лунинецкого района, превышает отметку 30 м. Несмотря на значимую глубину залегания некоторых площадей (свыше 20 м), отнесенных к классу 2, линейный коэффициент их вскрыши не превышает допустимых для данного вида сырья параметров [10]. Введение в разработку таких залежей, преимущественно залегающих под лесными и сельскохозяйственными землями, может допускаться в соответствии с действующим законодательством в случае отсутствия возможности разработки выделенных площадей глин, отнесенных к классу 1.

Резервными для разработки участками глины, освоение которых может быть допущено при наличии острого спроса на сырье и соблюдении ряда условий, являются 39 площадей. Они расположены в границах, проблематичных для использования подтипов земель (преимущественно земель, находящихся в стадии застройки).

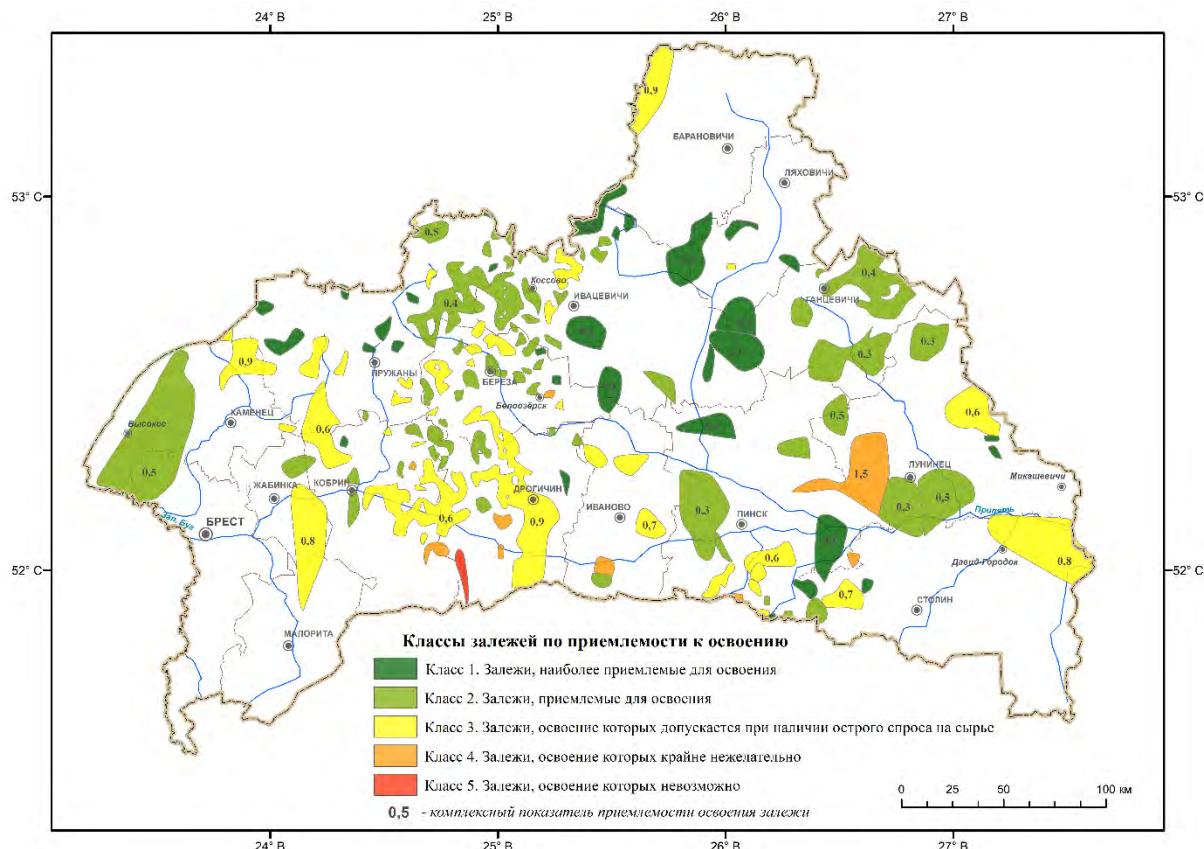


Рис.7. Карта залежей глин по перспективности освоения

Fig. 7. Map of clay deposits by development potential

Таблица 5. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей глин в разрезе классов приемлемости к освоению**Table 5. Information about the area characteristics of potential clay deposits by development acceptability class**

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	31	1146,9	15,5
2	57	3082,9	41,7
3	39	2733,2	37,0
4	10	400,6	5,4
5	1	30,4	0,4

Нежелательными и невозможными для включения в разработку являются залежи классов 4 и 5, занимающие наименьшие доли в структуре выявленных объектов ресурсного потенциала глин. Так, к числу нежелательных для отработки относятся залежи под землями, занятymi жилой застройкой и транспортными коммуникациями. Невозможной для освоения является всего одна залежь на территории Дрогичинского района, характеризующаяся небольшой мощностью, значимой глубиной залегания и приуроченностью большей частью к землям под водными объектами и болотами.

Рациональная схема ввода в освоение залежей суглинков отражена в табл. 6 и на рис. 8. Опираясь на табл. 6, прежде всего стоит отметить весьма обширную по площади (2386,3 км²) залежь рассматриваемого вида пород, приуроченную к территории Брестского, Жабинковского и Малоритского районов. Отнесение данной залежи к классу невозможных для освоения базировалось на учете двух факторов: относительно небольшой мощности (5 м) при значимой глубине залегания (72 м), а также приуроченности обширных ее площадей к землям, в границах которых не представляется возможным размещение карьеров (земли под водными объектами и болотами, населенными пунктами, в том числе г. Брестом).

Таблица 6. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей суглинков в разрезе классов приемлемости к освоению

Table 6. Information about the area characteristics of potential loam deposits by development acceptability class

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	4	74,5	2,6
2	3	105,1	3,7
3	3	175,4	6,3
4	1	28,0	1,0
5	3	2440,6	86,4

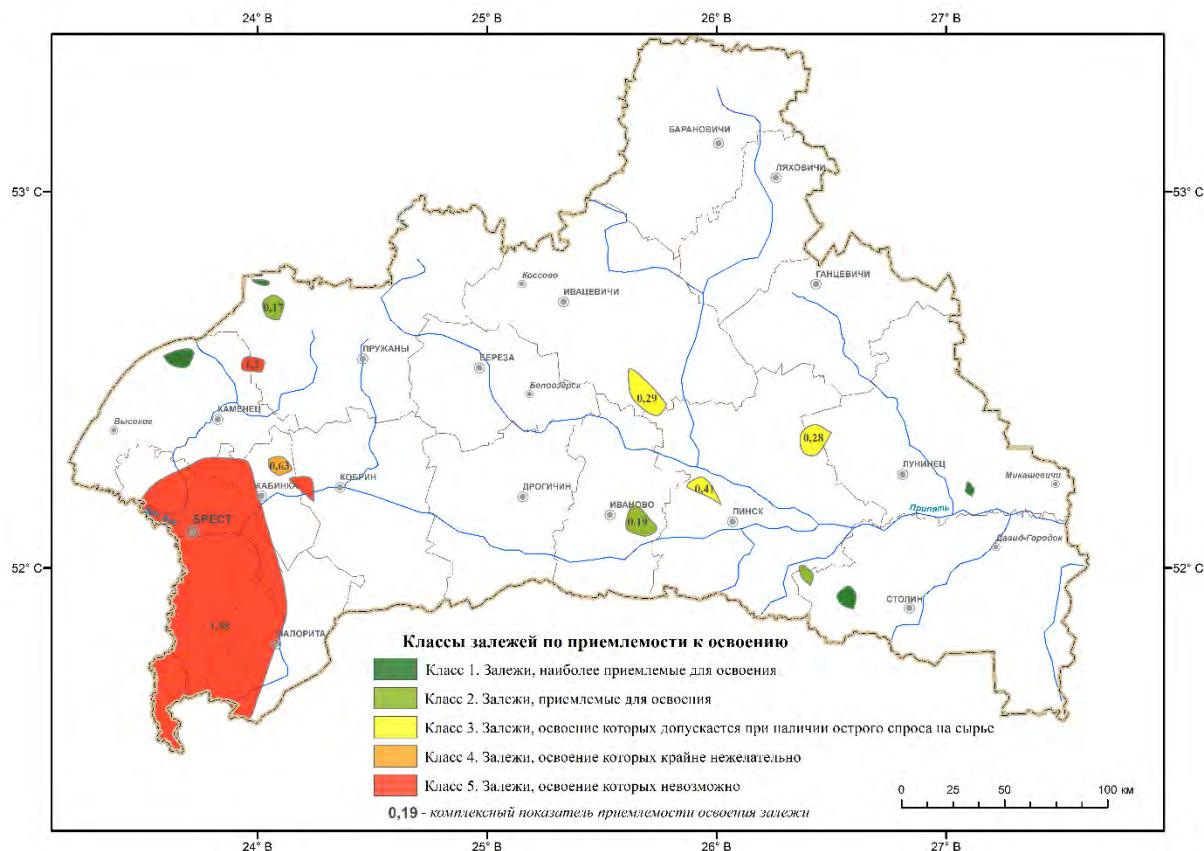


Рис. 8. Карта залежей суглинков по перспективности освоения

Fig. 8. Map of loam deposits by development potential

Залежи суглинков, отнесенные к другим классам, имеют практически одинаковый удельный вес в общей структуре выявленных залежей данного вида пород. Так, на долю наиболее приемлемых и приемлемых к освоению площадей приходится 2,6 % (Пружанский и Каменецкий районы) и 3,7 % (Ивановский и Столинский районы) соответственно. Отдельные из них, имеющие мощности 7–13 м, залегают непосредственно у земной поверхности.

На долю залежей, освоение которых возможно лишь при наличии острого спроса на сырье, приходится 6,3 %. Они отмечаются на территории Пинского и Ивацевичского районов, залегая под нарушенными землями, интенсивно используемыми сельскохозяйственными и лесными землями на значительных глубинах – около 40 м.

Фонд наиболее приемлемых и приемлемых для отработки выделенных в ходе исследования площадей супесчаных пород составляет 4362 км², или 76,2 % (табл. 7). Исходя из представленной на рис. 9 карты, отражающей пространственные особенности распределения супесей, прослеживается приуроченность наиболее крупных залежей данных классов к территории Столинского, Пинского и Каменецкого районов. Мощности их в среднем составляют около 15 м, а мощности перекрывающих отложений – около 20 м.

Таблица 7. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей супесей в разрезе классов приемлемости к освоению

Table 7. Information about the area characteristics of potential sandy loam deposits by development acceptability class

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	41	1167,9	20,4
2	53	3194,1	55,8
3	19	804,5	14,1
4	17	401,2	7,0
5	5	155,4	2,7

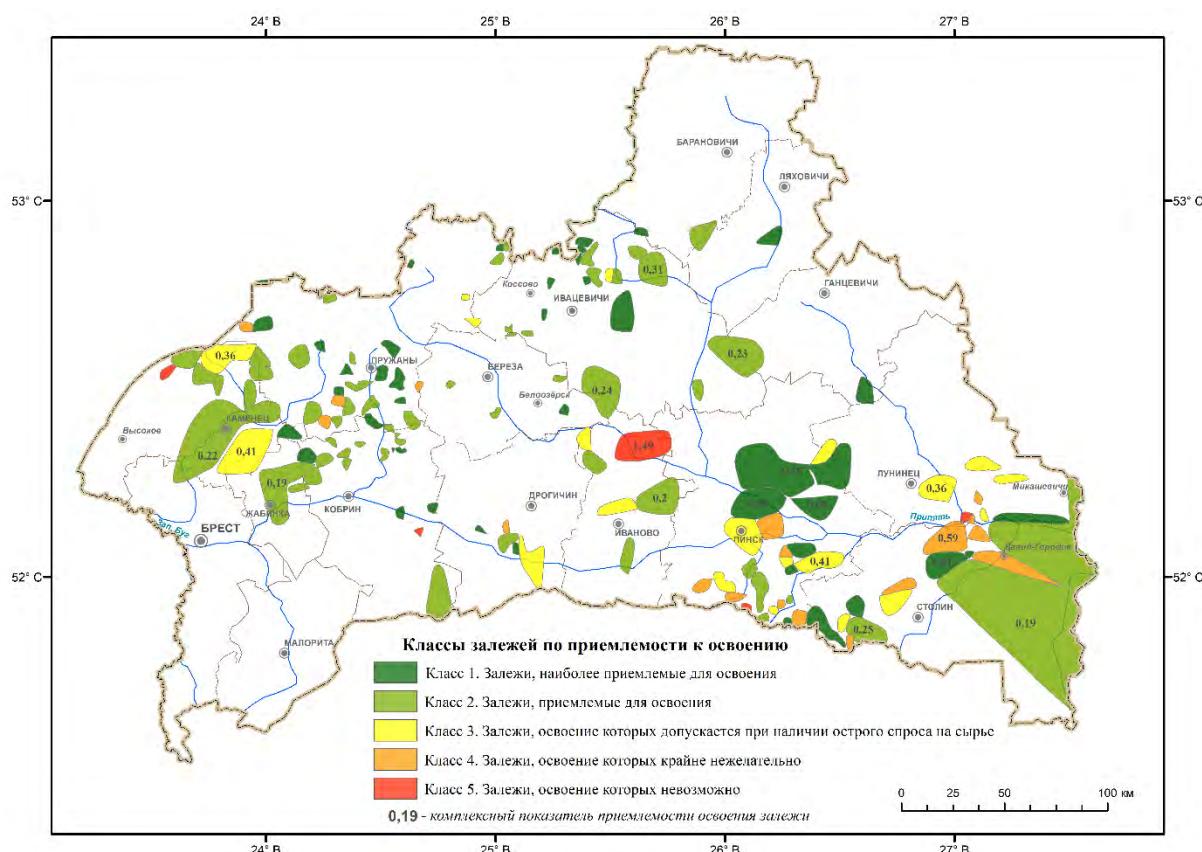


Рис. 9. Карта залежей супесей по перспективности освоения

Fig. 9. Map of sandy loam deposits by development potential

Залежи, относящиеся к классу 3, освоение которых допускается лишь при наличии острого спроса на сырье, занимают 14,1 % от общей площади выделенных в ходе геологического генетического моделирования участков. Это преимущественно залежи, границы которых охватывают несколько групп земель, а именно лесных и сельскохозяйственных земель с высокой интенсивностью использования и земель под застройкой (они труднодоступны для получения отвода под разработку). Мощность их составляет в среднем около 10 м, мощность перекрывающих отложений – 30 м и более. Наибольшие площади распространения характерны для Пружанского, Пинского и Лунинецкого районов.

Залежи супесей, относящиеся к классам 4 и 5, в основном сконцентрированы на территории Пинского, Ивановского и Столинского районов под застроенными землями и землями, занятymi водными объектами на большой глубине – 40–50 м и более. Такие залежи отличаются незначительными площадями, в то время как мощность некоторых из них достигает 17 м.

Торф. Результаты ранжирования залежей торфа по «национальной последовательности» включения в отработку приведены на рис. 10.

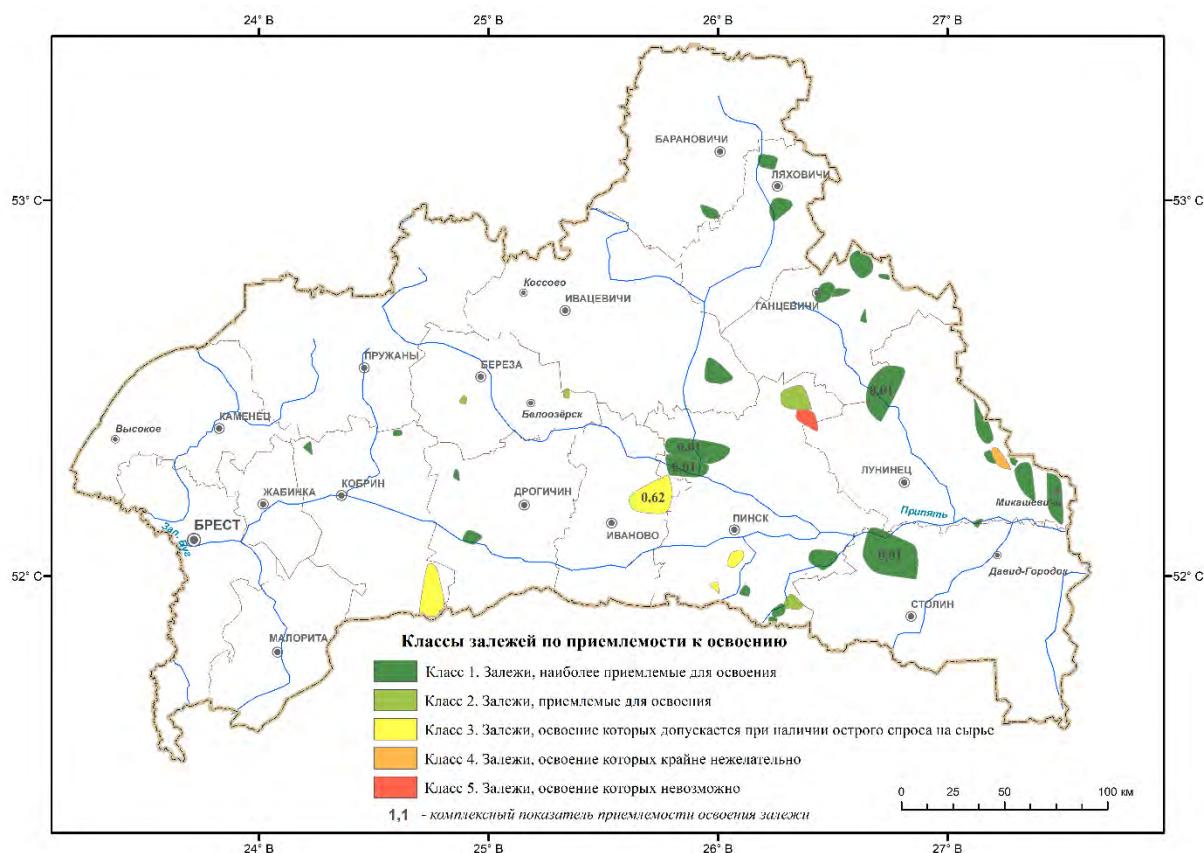


Рис. 10. Карта залежей торфа по перспективности освоения

Fig. 10. Map of peat deposits by development potential

В целом можно утверждать, что в сравнении с другими породами площади выделенных залежей торфа весьма незначительны. Большая их часть характеризуется залеганием непосредственно у земной поверхности (при средней мощности 3–4 м) в границах неиспользуемых либо малоиспользуемых земель. Таким образом, относительно приемлемости освоения преимущественная часть залежей фонда по торфу попадает в класс наиболее приемлемых для отработки (табл. 8).

Таблица 8. Сведения о площадных характеристиках потенциальных залежей торфа в разрезе классов приемлемости к освоению

Table 8. Information about the area characteristics of potential peat deposits by development acceptability class

Класс	Количество залежей	Площадь залежей, км ²	Удельный вес, %
1	27	842,1	71,8
2	4	76,5	6,5
3	4	209,6	17,8
4	1	18,7	1,6
5	1	26,5	2,3

На долю объектов ресурсного потенциала торфа, разработка которых допустима в случае возникновения острого спроса на сырье, приходится 17,8 % от общей площади выделенных участков. Такие залежи отмечаются на территории Кобринского, Ивановского и Пинского районов.

Нежелательными и недопустимыми для освоения с учетом современной структуры землеустройства региона, а также глубины залегания являются две залежи торфа суммарной площадью 45,2 км², приуроченные к территории Лунинецкого и Пинского районов.

Заключение. Предложен механизм классификации залежей нерудного сырья территории Брестской области (выделены по результатам цифрового геолого-генетического моделирования кайнозойских отложений региона) по приемлемости к освоению, базирующийся на учете критерия «категория земельного участка», а также геолого-промышленных характеристик оцениваемых ресурсов (мощности отложений и перекрывающих их пород). Для автоматизации процедуры классификации залежей по «рациональности» ввода в разработку с использованием ModelBuilder ГИС ArcGIS были сформированы инструменты «Классификация залежей по рациональному использованию» и «Классификация залежи по возможности освоения», применение которых позволило минимизировать временные и трудозатраты на реализацию данной процедуры. По результатам классификации сформирован комплект карт, отражающих последовательность отработки залежей разных типов пород кайнозойской толщи области, позволивший выявить пространственные особенности распределения возможных с точки зрения первоочередного освоения залежей ОПИ в границах региона. Сформированный комплект карт и базы данных по ним могут быть использованы местными территориальными органами власти при разработке регионального плана действий по изучению, освоению, рациональному использованию залежей местных видов сырья.

В то же время стоит отметить, что реализованный в настоящем исследовании подход обоснования целесообразности разработки залежей с учетом статуса земель стоит рассматривать как предварительный. С целью принятия финального решения о возможности, приемлемости разработки той или иной залежи необходимо провести более детальное изучение района ее размещения, что позволит объективнее оценить воздействие планируемых работ на компоненты природной среды.

Благодарности. Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках выполнения задания «Разработка геолого-информационной модели кайнозойских отложений территории Брестской и Гродненской областей как основы для прогнозирования новых наиболее доступных месторождений минерального сырья» (№ ГР 20211417) Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы.

Acknowledgements. The article was prepared with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus as part of the task "Development of a geological and information model of Cenozoic deposits in the Brest and Grodno regions as a basis for forecasting the new most accessible mineral deposits" of the State Research Institute "Natural Resources and Environment" for 2021–2025.

Список использованной литературы

1. Зайцев, А. Ю. Проблемы и особенности методики геолого-экономической и стоимостной оценки месторождений полезных ископаемых / А. Ю. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S21. – С. 400–408.
2. Мининг, С. С. Совершенствование геолого-экономической и стоимостной оценок месторождений полезных ископаемых – одно из актуальных направлений стратегической геологии / С. С. Мининг // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 1. – С. 215–221.
3. Москвитин, А. И. Стадии и этапы геолого-экономической оценки месторождений полезных ископаемых / А. И. Москвитин // Управление современной организацией: опыт, проблемы и перспективы. – 2016. – № 1. – С. 209–212.
4. Перекатов, Б. А. Геолого-экономическая оценка минерально-сырьевого потенциала недр Ленинградской области / Б. А. Перекатов, Ю. П. Тютиков, А. З. Романовский // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 5. – С. 9–12.
5. Унукович, А. В. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых Беларуси : учеб.-метод. пособие / А. В. Унукович, Н. С. Петрова. – Минск : БГУ, 2016. – 40 с.
6. Лютягин, Д. В. Геолого-экономическое обоснование вовлечения в отработку месторождений общераспространенных полезных ископаемых : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Д. В. Лютягин ; Российский государственный геолого-разведочный институт. – М., 2006. – 28 с.
7. Черемисина, Е. Н. Геоинформационные системы в природопользовании / Е. Н. Черемисина, А. А. Никитин // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 5–20.
8. Пешкова, Г. Ю. Экспресс-оценка привлекательности разработки месторождений глины на основе геолого-экономических критериев (на примере Ленинградской области) / Г. Ю. Пешкова // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера : вестник научно-исследовательского центра корпоративного

- права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. – 2016. – № 1. – С. 121–128.
9. Маевская, А. Н. Ранжирование земельного фонда административных районов Брестской области по приемлемости к освоению залежей строительного сырья / А. Н. Маевская, М. А. Богдасаров, Н. Н. Шешко // Природные ресурсы. – 2022. – № 2. – С. 45–56.
 10. Поиски и разведка месторождений минерального строительного сырья / В. И. Ярцев [и др.]. – Минск : БГУ, 2001. – 120 с.
 11. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Глинистые породы [Электронный ресурс] : распоряжение Министерства природных ресурсов Рос. Федерации, 5 июня 2007 г., № 37-р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902305753>. – Дата доступа: 07.03.2023.

References

1. Zajcev A. Ju. *Problemy i osobennosti metodiki geologo-jekonomiceskoy i stoimostnoj ocenki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Problems and peculiarities of geological, economic and cost evaluation methodology for mineral deposits]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* = Mining Information and Analytical Bulletin, 2016, no. S21, pp. 400–408. (in Russian)
2. Mining S. S. *Sovershenstvovanie geologo-jekonomiceskoy i stoimostnoj ocenok mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh – одно из актуальных направлений стратегической геологии* [Improving geological, economic and cost estimation of mineral deposits is one of the topical areas of strategic geology]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* = Mining Information and Analytical Bulletin, 2007, no. 1, pp. 215–221. (in Russian)
3. Moskvitin A. I. *Stadii i jetapy geologo-jekonomiceskoy ocenki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Stages and phases of geological and economic evaluation of mineral deposits]. *Upavlenie sovremennoj organizacij: opyt, problemy i perspektivy* = Managing a modern organisation: experiences, problems and prospects, 2016, no. 1, pp. 209–212. (in Russian)
4. Perekatov B. A., Tjutikov Yu. P., Romanovskij A. Z. *Geologo-jekonomiceskaja ocenka mineral'no-syr'evogo potenciala nedr Leningradskoj oblasti* [Geological and economic evaluation of the mineral resource potential of the subsoil of the Leningrad region]. *Razvedka i ohrana nedr* = Exploration and protection of mineral resources, 2005, no. 5, pp. 9–12. (in Russian)
5. Unukovich A. V., Petrova N. S. *Geologo-ekonomiceskaya otsenka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh Belarusi : ucheb.-metod. posobie* [Geological and economic assessment of mineral deposits in Belarus : training manual]. Minsk, BGU Publ., 2016, 40 p. (in Russian)
6. Lyutyagin D. V. *Geologo-ekonomiceskoe obosnovanie vovlecheniya v otrabotku mestorozhdenii obshcherasprostrannennyykh poleznykh iskopaemykh*. Avtoref. dis. ... kand. ekon. nauk [Geological and economic substantiation of involvement in the development of deposits of commonly occurring minerals. Ph. D. economics sci. abstract]. Moscow, 2006, 28 p. (in Russian)
7. Cheremisina E. N., Nikitin A. A. *Geoinformacionnye sistemy v prirodopol'zovanii* [Geoinformation systems in environmental management]. Geoinformatika = Geoinformatics, 2006, no. 3, pp. 5–20. (in Russian)
8. Peshkova G. Ju. *Jekspres-ocenka privlekatel'nosti razrabotki mestorozhdenij gliny na osnove geologo-jekonomiceskikh kriteriev (na primere Leningradskoj oblasti)* [Rapid assessment of the attractiveness of clay deposits based on geological and economic criteria (the example of the Leningrad region)]. Korporativnoe upravlenie i innovacionnoe razvitiye jekonomiki Severa = Corporate Governance and Innovative Development of the Northern Economy. Governance and Venture Capital Investment at Syktyvkar State University, 2016, no. 1, pp. 121–128. (in Russian)
9. Maevskaya A. N., Bogdasarov M. A., Sheshko N. N. *Ranzhirovaniye zemel'nogo fonda administrativnykh raionov Brestskoi oblasti po priemlemosti k osvoeniyu zalezhei stroitel'nogo syr'ya* [Ranking of the land fund of the administrative districts of the Brest region according to the acceptability to the development of deposits of construction raw materials]. Prirodnye resursy = Natural Resources, 2022, no. 2, pp. 45–56. (in Russian)
10. Yartsev V. I. [et al.]. *Poiski i razvedka mestorozhdenij mineral'nogo stroitel'nogo syr'ja* [Prospecting and prospecting for mineral deposits of construction raw materials]. Minsk, BGU Publ., 2001, 120 p. (in Russian)
11. *Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu klassifikacii zapasov mestorozhdenij i prognoznyh resursov tverdyh poleznyh iskopaemyh. Glinistye porody* [Methodological Recommendations for the Application of the Classification of Reserves of Deposits and Inferred Resources of Solid Minerals. Clayey rocks]. Rasporyazhenie Ministerstva prirodnnyh resursov Rossiiskoi Federacii = Decree of the Ministry of Natural Resources of Russian Federation. June 5, 2007, no. 37-p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902305753> (accessed 7 March 2023). (in Russian)

Информация об авторах

Маевская Анна Николаевна – магистр географических наук, исследователь, преподаватель-стажер кафедры географии и природопользования, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (б-р Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь). E-mail: maevskaya.anna@inbox.ru

Богдасаров Максим Альбертович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор кафедры географии и природопользования, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (б-р Космонавтов, 21, 224016, Брест, Беларусь); профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БрГТУ (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: bogdasarov73@mail.ru

Шешко Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской части, доцент кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: optimum@tut.by

Information about the authors

Anna N. Mayevskaya – Master of Geography, Researcher, Trainee Lecturer of the Department of Geography and Nature Management, Brest State A. S. Pushkin University (Cosmonauts Boulevard, 21, 224016, Brest, Belarus). E-mail: maevskaya.anna@inbox.ru

Maksim A. Bahdasarau – Dr. Sc. (Geological and Mineralogical), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus; Professor of the Department of Geography and Nature Management, Brest State A. S. Pushkin University (Cosmonauts Boulevard, 21, 224016, Brest, Belarus); Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Brest State Technical University (Moskovskaya St., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: bogdasarov73@mail.ru

Nikolay N. Sheshko – Ph. D. (Technics), Associate Professor, Head of the Research Department, Associate Professor of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya St., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: optimum@tut.by

STRATIGRAPHY AND ICHTHYOFAUNA OF THE UPPER EMSIAN-GIVETIAN DEPOSITS IN THE SECTION OF THE KLIMOVICHI 4п BOREHOLE (MOGILEV REGION, BELARUS)

D. P. Plax¹, M. A. Bahdasarau^{2,3}

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus;

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

³Brest State Technical University, Brest, Belarus

Abstract. The paper presents the results of a palaeoichthyological study of the core samples from the Klimovichi 4п borehole drilled in the Klimovichi district of the Mogilev region in eastern Belarus. Based on the ichthyofauna remains, as well as on the lithological and geophysical data, a detailed stratigraphic division of the Upper Emsian-Givetian deposits exposed by the above-mentioned borehole was performed. Their detailed description is given. The ichthyofauna evidences were used to compare these deposits with the similar age sediments developed within the adjacent territories of Ukraine, Russia and the Baltic States. The data obtained on the Late Emsian-Givetian ichthyofauna supplement to a certain extent the systematic composition of this ichthyofauna within the territory of Belarus. The results presented should be taken into account in the future when a large-scale geological survey will be performed within the studied area.

Keywords: Belarus; ichthyofauna; Upper Emsian; Eifelian and Givetian deposits; Lower and Middle Devonian.

For citation. Plax D. P., Bahdasarau M. A. Stratigraphy and ichthyofauna of the Upper Emsian-Givetian deposits in the section of the Klimovichi 4п borehole (Mogilev region, Belarus). *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 151–172.

СТРАТИГРАФИЯ И ИХТИОФАУНА ВЕРХНЕЭМССКО-ЖИВЕТСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЗРЕЗЕ СКВАЖИНЫ КЛИМОВИЧСКАЯ 4п (МОГИЛЁВСКАЯ ОБЛАСТЬ, БЕЛАРУСЬ)

Д. П. Плакс¹, М. А. Богдасаров^{2,3}

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь;

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

³Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты палеоихтиологического изучения керна скважины Клиновичская 4п, пробуренной в Клиновичском районе Могилёвской области на востоке Беларуси. На основе ихтиофауны, а также литологических и геофизических данных выполнено детальное стратиграфическое расчленение верхнеэмсско-живетских отложений, вскрытых вышеупомянутой скважиной. Приведено подробное их описание. По ихтиофауне проведено сопоставление этих отложений с одновозрастными образованиями, развитыми на смежных территориях Украины, России и стран Балтии. Полученные данные по позднеэмсско-живетской ихтиофауне несколько дополняют их систематический состав на территории Беларуси. Представленные результаты исследований в дальнейшем следует учитывать при проведении крупномасштабной геологической съемки в исследуемом районе.

Ключевые слова: Беларусь; ихтиофауна; верхнеэмсские; эйфельские и животские отложения; нижний и средний девон.

Для цитирования. Плакс Д. П., Богдасаров М. А. Стратиграфия и ихтиофауна верхнеэмсско-живетских отложений в разрезе скважины Клиновичская 4п (Могилёвская область, Беларусь) // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 151–172.

Introduction. The paper presents the results of a palaeoichthyological study of the Upper Emsian, Eifelian and Givetian deposits exposed in 2021 by the Klimovichi 4п parametric borehole, which was drilled within the Orsha Depression, namely, in the zone of junction of the Orsha depression, Surazh Buried Ridge of the Voronezh Antecline and Zhlobin Saddle (Fig. 1). The study of the ichthyofauna together with the lithological and logging data allowed the authors to determine the age of the rocks and to substantiate the regional and local stratigraphic units distinguished in this borehole section, as well as to correlate them with the similar age deposits of different facies developed within the adjacent territories of Lithuania, Latvia, Russia and Ukraine. The subdivision and comparison of the deposits from the other parts of the section that do not contain the ichthyofauna remains was made using the information on the miospore remains, as well as on the basis of the logging data, material composition of the rocks and their stratigraphic position in the section.

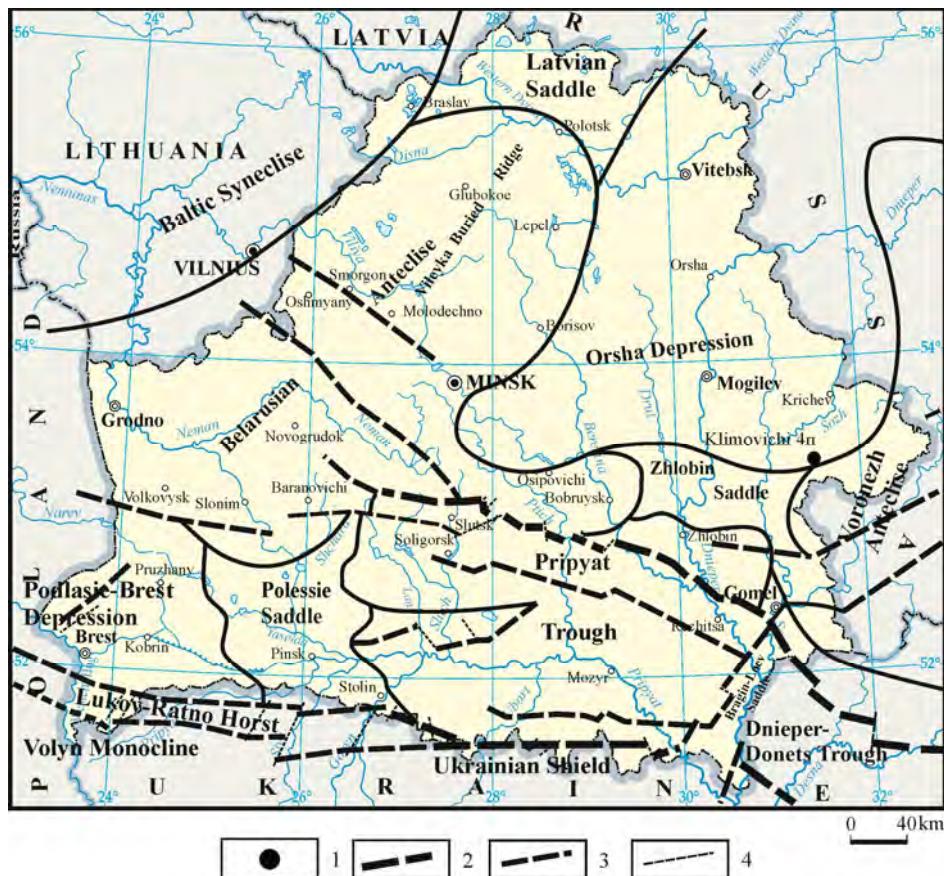


Fig. 1. Map showing the location of the borehole section in which the ichthyofauna was studied, indicating the main tectonic structures on the territory of Belarus (according to R. G. Garetsky, R. Ye. Aizberg from [1]): 1 – the studied borehole section; faults: 2 – superregional, 3 – regional and subregional, 4 – local

Рис. 1. Карта, показывающая местонахождение разреза скважины, в которой была изучена ихтиофауна, с указанием основных тектонических структур на территории Беларуси (по Р. Г. Гарецкому, Р. Е. Айзбергу из [1]): 1 – изученный разрез скважины; разломы: 2 – суперрегиональные, 3 – региональные и субрегиональные, 4 – локальные

Materials and methods. The descriptions of the Upper Emsian-Givetian deposits, geological and geochemical materials and core samples selected for palaeontological and stratigraphic studies from the Klimovichi 4п parametric borehole served as the basis for this work. The remains of various ichthyofauna groups – the agnathans and fishes were detected in many selected core samples after their technical treatment. The identification of the skeletal elements of these vertebrate representatives was mainly based on their morphological features. The histological data were also used to determine some fish remains. However, due to the fragmentation and poor preservation of some ichthyofaunistic material, it was not always possible to determine the specimen to a species and even to a genus. For this reason, some of the agnathan and fish definitions were left in the open nomenclature.

The ichthyofauna remains extracted from the rocks were subject to the ichthyofaunistic analysis. The results of this analysis together with the lithological, geophysical logging data, and, sometimes, with palynological data, served as the basis for both the rock age determination and identification of the regional and local stratigraphic units in the section of the Upper Emsian-Givetian deposits of the above-mentioned borehole, and for their correlation with same age deposits within of the transboundary territories of the adjacent countries. The Stratigraphic Chart of the Devonian deposits of Belarus, 2010 [2] was taken as a stratigraphic basis for the subdivision of the Upper Emsian-Givetian deposits within the studied area.

The pictures of the macroscopic skeletal elements of the ichthyofauna were taken with PowerShot SX130 IS and Sony A58 cameras with Industar-50 lens with macrorings. The electron micrographs of the agnathan and fish remains were made with scanning electron microscopes JCM-7000 and JSM-5610 LV (JEOL, Japan). The pictures were processed using the Adobe Photoshop CS6 program, and the drawings were performed using the CorelDRAW 2019 program. A microscope Axioskop 40 A Pol was used to study the internal structure of some ichthyofauna remains.

Most of the studied ichthyofauna remains are from the personal collection of one of the authors, and its significantly smaller part is stored in the palaeontological collection of the Department of Mining, Belarusian National Technical University (Minsk).

STRATIGRAPHIC SUBDIVISION OF THE UPPER EMSIAN-GIVETIAN DEPOSITS OF THE STUDIED BOREHOLE

The Klimovichi 4n borehole was drilled in the zone of junction of the Orsha Depression, Surazh Buried Ridge of the Voronezh Antecline and Zhlobin Saddle near the town of Klimovichi, Klimovichi district, Mogilev region (see Fig. 1). A detailed stratigraphic division of the exposed deposits (Fig. 2) was based on the results of the lithological and palaeoichthyological studies of the rocks with an account taken of the geophysical logging data. A detailed lithological description of the Klimovichi 4n borehole sequence (from bottom to top), as well as its biostratigraphic and geophysical properties are presented below. Some skeletal elements of the vertebrates from the rocks of this borehole are shown in Plates I–VII.

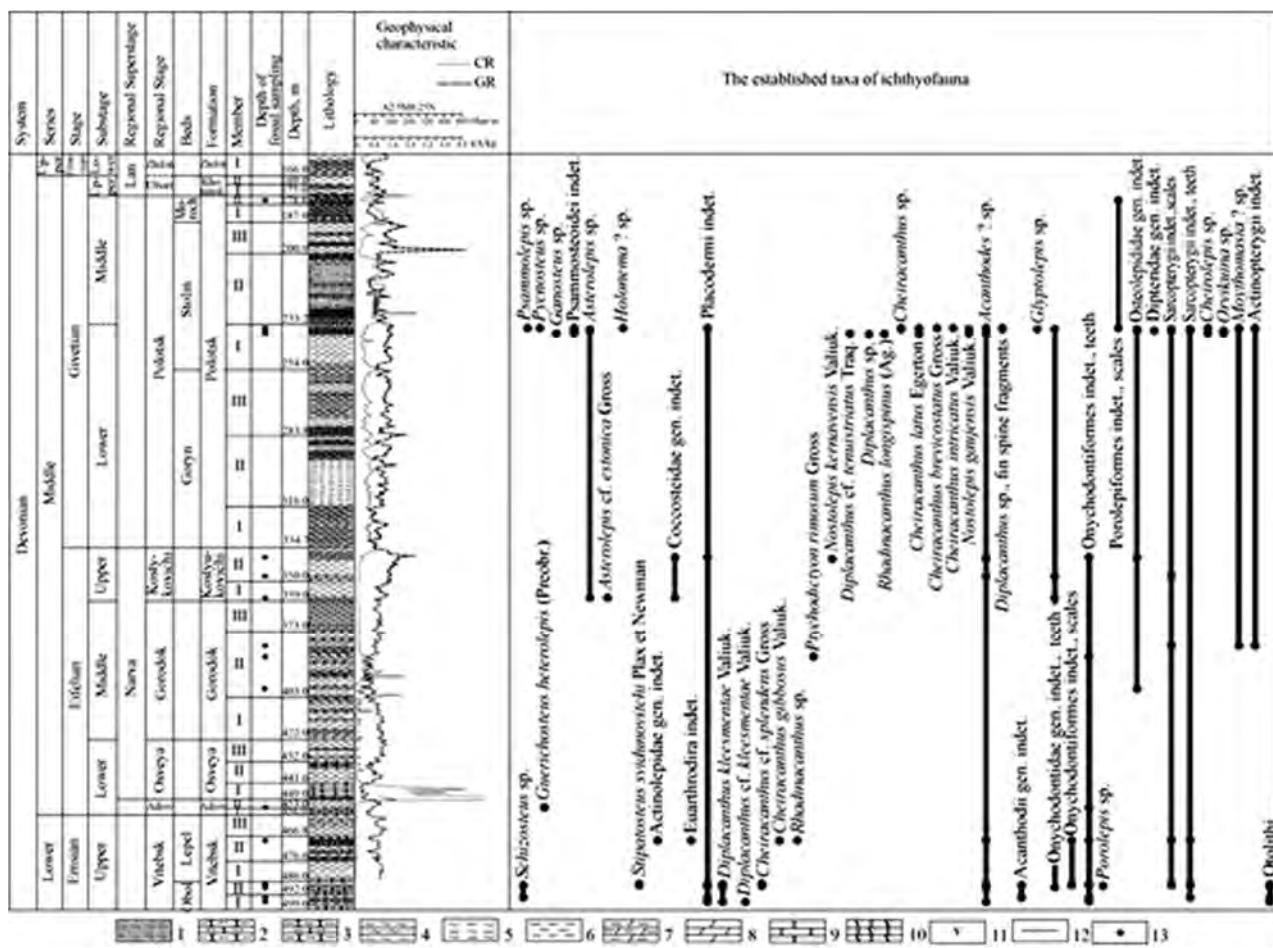


Fig. 2. Geological section of the Devonian deposits of the Klimovichi 4n borehole with the distribution of the remains of the ichthyofauna: 1 – sands; 2 – sandstones; 3 – clayey sandstones; 4 – siltstones; 5 – argillaceous-silty rocks; 6 – clays; 7 – clayey marls; 8 – marls; 9 – dolomites; 10 – carbonate-sulfate rocks; 11 – gypsum nests and interlayers; 12 – discontinuity surfaces; 13 – ichthyofauna sampling sites

Рис. 2. Геологический разрез девонских отложений скважины Клиновичская 4п с указанием распространения остатков ихтиофауны: 1 – пески; 2 – песчаники; 3 – глинистые песчаники; 4 – алевролиты; 5 – глинисто-алевритовые породы; 6 – глины; 7 – глинистые мергели; 8 – мергели; 9 – доломиты; 10 – карбонатно-сульфатные породы; 11 – гипсовые гнезда и прослои; 12 – поверхности перерыва; 13 – места отбора образцов ихтиофауны

486.0–499.0 m, thickness 13.0 m – Lower Devonian (D_1), Emsian Stage (D_{1e}), Upper Emsian Substage (D_{1e2}), Vitebsk Regional Stage (Formation) (D_{1vt}), Obol Beds (D_{1ob}). These deposits are represented by the interbedded sandstones and clays underlain by the Vendian rocks, that can be divided into two members.

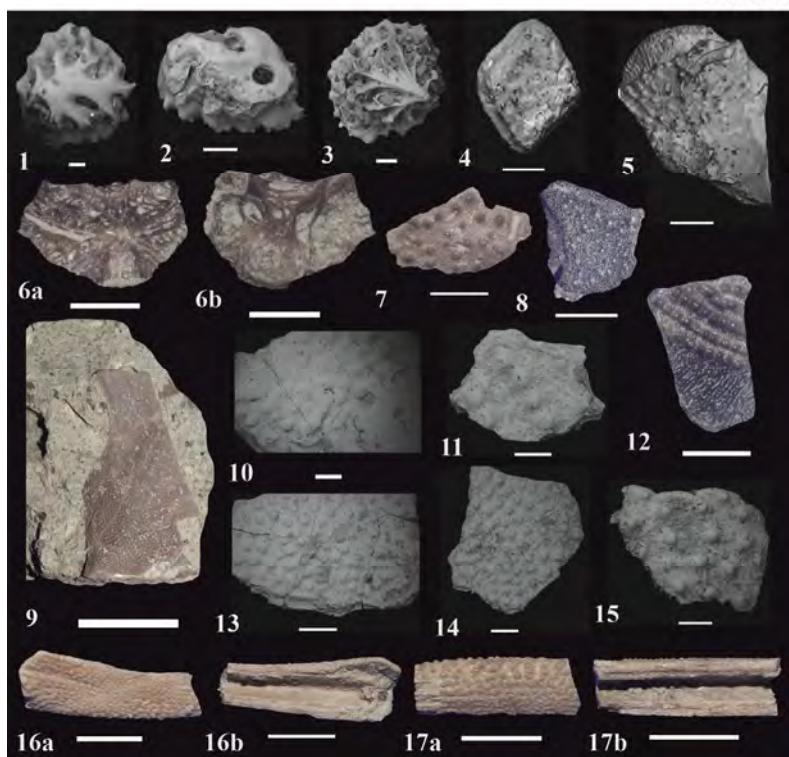
Plate I

Plate I. Heterostracan and Placoderm skeletal element fragments from the Klimovichi 4n borehole. The skeletal elements of the agnathans and fishes from the Upper Emsian, Eifelian and Givetian, Lower and Middle Devonian.

Scale bar 100 μm for Figures 1 and 2; 200 μm for Figure 3; 500 μm for Figures 4, 5, 10, 11, 14, 15;

1 mm for Figure 13; 2 mm for Figures 6a, 6b, 9, 12; 3 mm for Figure 7; 5 mm for Figures 8, 16a, 16b, 17a, 17b.

Figure 1 – *Pycnosteus* sp. Specimen № 143/4-22, depth of 235.0 m, $\times 100$, dentine tubercle, top view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 2 – *Psammosteoidei* indet. Specimen № 143/8-11, depth of 237.5 m, $\times 200$, dentine tubercle, basal view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 3 – *Ganosteus* sp. Specimen № 143/8-12, depth of 237.5 m, $\times 65$, dentine tubercle, top view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 4 – *Holonema* ? sp. Specimen № 143/4-11, depth of 235.0 m, $\times 50$, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 5 – *Asterolepis* cf. *estonica* Gross, 1940. Specimen № 143/17-3, depth of 357.5 m, $\times 45$, apparently Cv2 plate fragment, external view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 6 – *Asterolepis* sp. Specimen № 143/17-4, depth of 357.5 m, nuchal plate: a – external view, b – internal view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 7 – *Coccosteidae* gen. indet. Specimen № 143/17-5, depth of 357.5 m, indefinable plate fragment, external view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 8 – Placodermi indet. Specimen № 143/28-17, depth of 467.5 m, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 9 – *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020. Specimen № 143/28-18, depth of 467.5 m, suborbital plate, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 10 – Placodermi indet. Specimen № 143/28-7, depth of 467.5 m, $\times 35$, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 11 – Placodermi indet. Specimen № 143/28-6, depth of 467.5 m, $\times 50$, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 12 – Actinolepidae gen. indet. Specimen № 143/28-18, depth of 467.5 m, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 13 – Placodermi indet. Specimen № 143/30-2, depth of 487.8 m, $\times 25$, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 14 – Placodermi indet. Specimen № 143/30-3, depth of 487.8 m, $\times 30$, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 15 – Placodermi indet. Specimen № 143/30-27, depth of 487.8 m, $\times 40$, indefinable plate fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 16 – *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020. Specimen № 143/30-47, depth of 487.8 m, spiral plate fragment: a – external view, b – internal view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 17 – *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020. Specimen № 143/30-48, depth of 487.8 m, spiral plate fragment: a – external view, b – internal view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица I. Фрагменты скелетных элементов гетеростраков и плакодерм из скважины

Климовичская 4п. Скелетные элементы бесчелюстных и рыб из верхнего эмса, эйфеля и живета, нижний и средний девон. Масштабная линейка 100 μm для фигур 1 и 2; 200 μm для фигуры 3;

500 μm для фигур 4, 5, 10, 11, 14, 15; 1 мм для фигуры 13; 2 мм для фигур 6a, 6b, 9, 12;

3 мм для фигуры 7; 5 мм для фигур 8, 16a, 16b, 17a, 17b.

Фигура 1 – *Pycnosteus* sp. Экземпляр № 143/4-22, глубина 235,0 м, $\times 100$, дентиновый туберкул, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 2 – *Psammosteoidei* indet. Экземпляр № 143/8-11, глубина 237,5 м, $\times 200$, дентиновый туберкул, вид снизу; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 3 – *Ganosteus* sp. Экземпляр № 143/8-12, глубина 237,5 м, $\times 65$, дентиновый туберкул, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 4 – *Holonema* ? sp. Экземпляр № 143/4-11, глубина 235,0 м, $\times 50$, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт,

столинские слои. Фигура 5 – *Asterolepis cf. estonica* Gross, 1940. Экземпляр № 143/17-3, глубина 357,5 м, ×45, по-видимому, фрагмент пластинки Cv2, вид снаружи; костюковичский горизонт. Фигура 6 – *Asterolepis* sp. Экземпляр № 143/17-4, глубина 357,5 м, nuchale: a – вид снаружи, b – вид изнутри; костюковичский горизонт. Фигура 7 – *Coccosteidae* gen. indet. Экземпляр № 143/17-5, глубина 357,5 м, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; костюковичский горизонт. Фигура 8 – *Placodermi* indet. Экземпляр № 143/28-17, глубина 467,5 м, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 9 – *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020. Экземпляр № 143/28-18, глубина 467,5 м, suborbitalе, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 10 – *Placodermi* indet. Экземпляр № 143/28-7, глубина 467,5 м, ×35, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 11 – *Placodermi* indet. Экземпляр № 143/28-6, глубина 467,5 м, ×50, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 12 – *Actinolepidae* gen. indet. Экземпляр № 143/28-18, глубина 467,5 м, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 13 – *Placodermi* indet. Экземпляр № 143/30-2, глубина 487,8 м, ×25, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 14 – *Placodermi* indet. Экземпляр № 143/30-3, глубина 487,8 м, ×30, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 15 – *Placodermi* indet. Экземпляр № 143/30-27, глубина 487,8 м, ×40, фрагмент неопределенной пластинки, вид снаружи; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 16 – *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020. Экземпляр № 143/30-47, глубина 487,8 м, фрагмент spinale: a – вид снаружи, b – вид изнутри; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 17 – *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020. Экземпляр № 143/30-48, глубина 487,8 м, фрагмент spinale: a – вид снаружи, b – вид изнутри; витебский горизонт, обольские слои

The first member (depth interval of 492.0 to 499.0 m, 7.0 m thick) is composed of the sandstones, clays and dolomite. The sandstones are light lilac-grey, greenish-grey, grey, whitish, sometimes, lilac, inequigranular (from fine- to coarse-grained, but mainly medium- and coarse-grained), quartzitic, hard, with clayey and clayey-dolomitic cement, with rare fragments of the lingulid shells, not numerous scales of *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986 [3], *Acanthodes* ? sp., small plate fragments of *Placodermi* indet., isolated teeth of *Onychodontiformes* indet., one scale fragment of *Sarcopterygii* indet. and rare otoliths. The bedding surfaces of the sandstones are uneven, tuberculate, with clay lenses. The clays are greenish-grey, lilac-grey, dark green, dolomitic, fragmented, platy-fragmented, in places, with white shell detritus and slickensides. Beige-grey, peliticomorphic, crusty, 5 cm thick dolomites occur in the upper part of the depth interval from 496.0 m to approximately 497.0 m.

The second member (depth interval of 486.0 to 492.0 m, 6.0 m thick) is represented by the sandstones, clays, marls and dolomites. The sandstones are greenish-lilac-grey, pinkish-beige, in places, with oxidation spots, inequigranular (mainly fine- and medium-grained), with gypsum-argillaceous cement, massive, dense, thick-platy, splitting evenly along the bedding surfaces. The clays are green-grey, lilac-grey, thin-fine-grained (foliated, thin-platy), in places, with numerous small oxidation spots and slickensides, as well as with thin interlayers of the greenish-grey, fine-grained, dense siltstones; locally, with some isolated ostracodes, rare fragments of the lingulid shells, a small fragmentary plate of *Schizosteus* sp., a suborbital plate, small indefinable plates and three fragmentary spinal plates of *Stipatosteus svidunovitchi* Plax et Newman, 2020 [4], small plates of *Placodermi* indet., numerous scales of *Diplacanthus kleesmentae*, *D. cf. kleesmentae*, *Cheiracanthus* cf. *splendens* Gross, 1973 [5], *Acanthodes* ? sp., some few fragmentary fin spines of *Acanthodii* gen. indet., the scales of *Porolepis* sp., numerous scales and teeth of *Onychodontiformes* indet., *Sarcopterygii* indet., otoliths. The marls are greenish-grey, dense, unclearly laminated, platy, with rare small fragments of the lingulid shells, small plates of *Placodermi* indet., a few teeth of *Onychodontiformes* indet., *Sarcopterygii* indet., some isolated scales of *Acanthodes* ? sp. and numerous otoliths. In addition, in this interval there are thin layers of peliticomorphic and microcrystalline beige dolomite with a slightly uneven bedding surface separated by thin patches of dark grey clays.

456.0–486.0 m, thickness 30.0 m – Lower Devonian (D₁), Emsian Stage (D_{1e}), Upper Emsian Sub-stage (D_{1e2}), Vitebsk Regional Stage (Formation) (D_{1vt}), Lepel Beds (D_{1lp}). The strata are represented by the interbedded clayey sandstones, clays, marls and dolomites. The values of the conventional resistivity over the strata are low and reach 20–30 Ohm·m, while the γ-activity value varies from 0.5 to 1.4 πA/kg. The rocks are described by the following features.

The first member (depth interval of 476.6 to 486.0 m, 9.4 m thick) is built by the sandstones and clays. The sandstones are green-grey, inequigranular, with clayey-gypsum cement, unevenly layered, with nodules, the burrows of the mud-eaters, with greenish-grey clayey pebbles. There are drying cracks in thin clayey interlayers and gravel grains in the sandstones. The clays are variously colored, spotted (lilac-grey, green-grey, grey, beige-grey, ochreous-grey, red-brown, terracotta, chocolate), finely gravel, and the clays are grey, beige-grey, foliated (thin platy). The clays contain gypsum inclusions and abundant organic remains.

Plate II

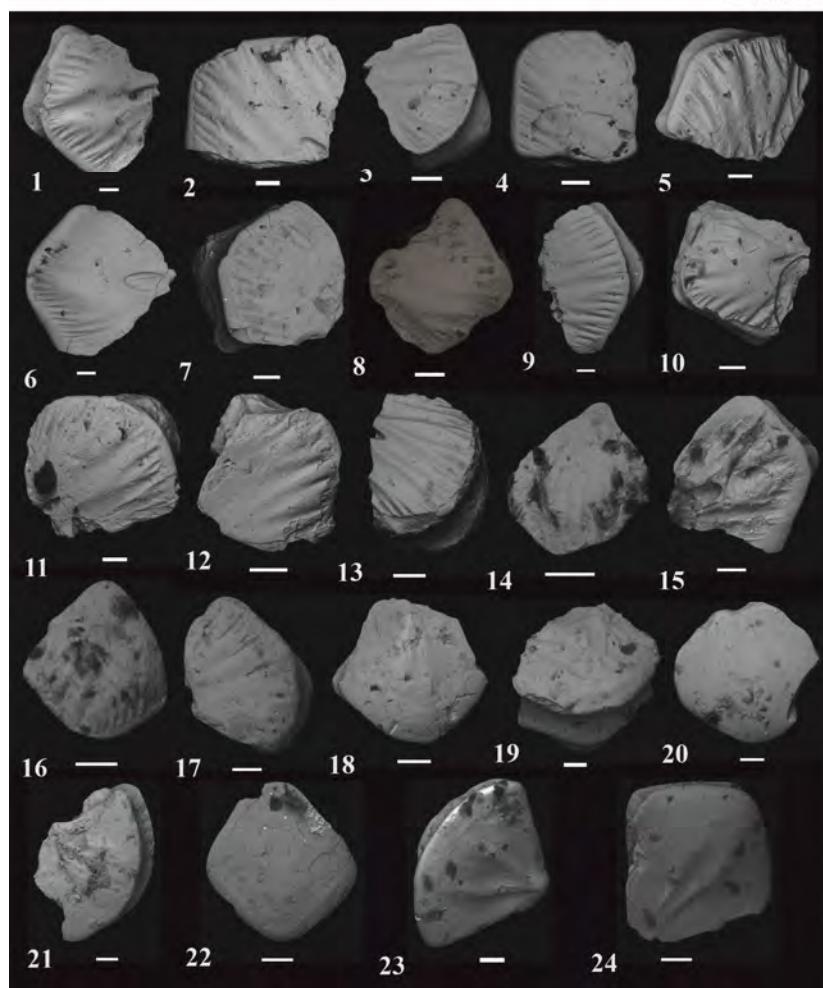


Plate II. Acanthodian scales from the Klimovichi 4n borehole. Scales of the acanthodians from the Upper Emsian and Givetian, Lower and Middle Devonian. Scale bar 50 µm for Figure 15; 100 µm for Figures 1, 2, 4–14, 16, 18–24; 200 µm for Figures 3 and 17.

Figure 1 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/4-3, depth of 235.0 m, ×100, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 2 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/4-9, depth of 235.0 m, ×100, scale fragment, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 3 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/4-15, depth of 235.0 m, ×80, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 4 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Specimen № 143/4-20, depth of 235.0 m, ×150, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 5 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Specimen № 143/4-24, depth of 235.0 m, ×110, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 6 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/4-25, depth of 235.0 m, ×100, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 7 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/4-27, depth of 235.0 m, ×130, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 8 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/5-7, depth of 235.5 m, ×170, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 9 – *Cheiracanthus* sp. Specimen № 143/5-8, depth of 235.5 m, ×100, scale fragment, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 10 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/5-10, depth of 235.5 m, ×140, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 11 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/5-12, depth of 235.5 m, ×100, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 12 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Specimen № 143/5-19, depth of 235.5 m, ×180, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 13 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/5-20, depth of 235.5 m, ×160, scale fragment, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 14 – *Cheiracanthus* sp. Specimen № 143/8-6, depth of 237.5 m, ×250, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 15 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Specimen № 143/8-7, depth of 237.5 m, ×300, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 16 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Specimen № 143/8-9, depth of 237.5 m, ×200, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 17 – *Cheiracanthus* sp. Specimen № 143/28-9, depth of 467.5 m, ×75, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 18 – *Cheiracanthus* cf. *splendens* Gross, 1973. Specimen № 143/29-4, depth of 487.0 m, ×150, scale, with worn crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 19 – *Cheiracanthus* sp. Specimen № 143/30-11, depth of 487.8 m, ×110, scale fragment, anterior crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 20 – *Cheiracanthus* cf. *splendens* Gross, 1973.

Specimen № 143/30-21, depth of 487.8 m, $\times 130$, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 21 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Specimen № 143/30-36, depth of 487.8 m, $\times 100$, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 22 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Specimen № 143/30-40, depth of 487.8 m, $\times 150$, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 23 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Specimen № 143/30-42, depth of 487.8 m, $\times 120$, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 24 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Specimen № 143/30-45, depth of 487.8 m, $\times 150$, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица II. Чешуи акантодов из скважины Климовичская 4п. Чешуи акантодов из верхнего эмса и живета, нижний и средний девон. Масштабная линейка 50 μm для фигуры 15; 100 μm для фигур 1, 2, 4–14, 16, 18–24; 200 μm для фигур 3 и 17.

Фигура 1 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/4-3, глубина 235,0 м, $\times 100$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 2 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/4-9, глубина 235,0 м, $\times 100$, фрагмент чешуи, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 3 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/4-15, глубина 235,0 м, $\times 80$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 4 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Экземпляр № 143/4-20, глубина 235,0 м, $\times 150$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 5 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Экземпляр № 143/4-24, глубина 235,0 м, $\times 110$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 6 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/4-25, глубина 235,0 м, $\times 100$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 7 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/4-27, глубина 235,0 м, $\times 130$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 8 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/5-7, глубина 235,5 м, $\times 170$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 9 – *Cheiracanthus* sp. Экземпляр № 143/5-8, глубина 235,5 м, $\times 100$, фрагмент чешуи, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 10 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/5-10, глубина 235,5 м, $\times 140$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 11 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/5-12, глубина 235,5 м, $\times 100$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 12 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Экземпляр № 143/5-19, глубина 235,5 м, $\times 180$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 13 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/5-20, глубина 235,5 м, $\times 160$, фрагмент чешуи, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 14 – *Cheiracanthus* sp. Экземпляр № 143/8-6, глубина 237,5 м, $\times 250$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 15 – *Cheiracanthus latus* Egerton, 1861. Экземпляр № 143/8-7, глубина 237,5 м, $\times 300$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 16 – *Cheiracanthus intricatus* Valiukevičius, 1985. Экземпляр № 143/8-9, глубина 237,5 м, $\times 200$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 17 – *Cheiracanthus* sp. Экземпляр № 143/28-9, глубина 467,5 м, $\times 75$, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 18 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Экземпляр № 143/29-4, глубина 487,0 м, $\times 150$, чешуя, с видом на истертую корону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 19 – *Cheiracanthus* sp. Экземпляр № 143/30-11, глубина 487,8 м, $\times 110$, фрагмент чешуи, вид сверху спереди; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 20 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Экземпляр № 143/30-21, глубина 487,8 м, $\times 130$, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 21 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Экземпляр № 143/30-36, глубина 487,8 м, $\times 100$, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 22 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Экземпляр № 143/30-40, глубина 487,8 м, $\times 150$, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 23 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Экземпляр № 143/30-42, глубина 487,8 м, $\times 120$, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 24 – *Cheiracanthus cf. splendens* Gross, 1973. Экземпляр № 143/30-45, глубина 487,8 м, $\times 150$, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои

The second member (depth interval of 466.8 to 476.6 m, 9.8 m thick) is composed of the sandstones, clays and dolomites. The grey-brown, green-grey, whitish, quartz, medium-grained, layered, coarse-platy sandstones (split into thin horizontal plates) with clayey, in places, clayey-dolomitic and clayey-gypsum cement, with two small plates of *Actinolepidae* gen. indet., fragmentary indefinable small plates of *Euarthrodira* indet., *Placodermi* indet., few scales of *Cheiracanthus gibbosus* Valiukevičius, 1986 [3], *Rhadinacanthus* sp., *Acanthodes* ? sp., *Acanthodii* gen. et sp. indet., single teeth and scales of *Onychodontiformes* indet., *Sarcopterygii* indet. The clays are green-grey, grey, poorly dolomitic, finely gravel. The dolomites are cream-colored, cream-white, light grey, granular, finely cavernous, in places, sandy, unclearly laminated, bedding surfaces are uneven, but, in some places, the bedding surfaces are wavy.

The third member (depth interval of 456.0 to 466.8 m, 10.8 m thick) is mainly represented by the clays and marls. The clays are green-grey, terracotta-brown, from thin-platy and foliated to lumpy-rubble and fine-pebbly, in some areas, layered, in places, with the slickensides. The clays contain thin layers or lenses of the light grey, weakly cavernous, hard, unclearly laminated dolomites. The marls are green-grey, dense, unclearly laminated, in some places, with sandy material powders found within the rock volume.

Plate III

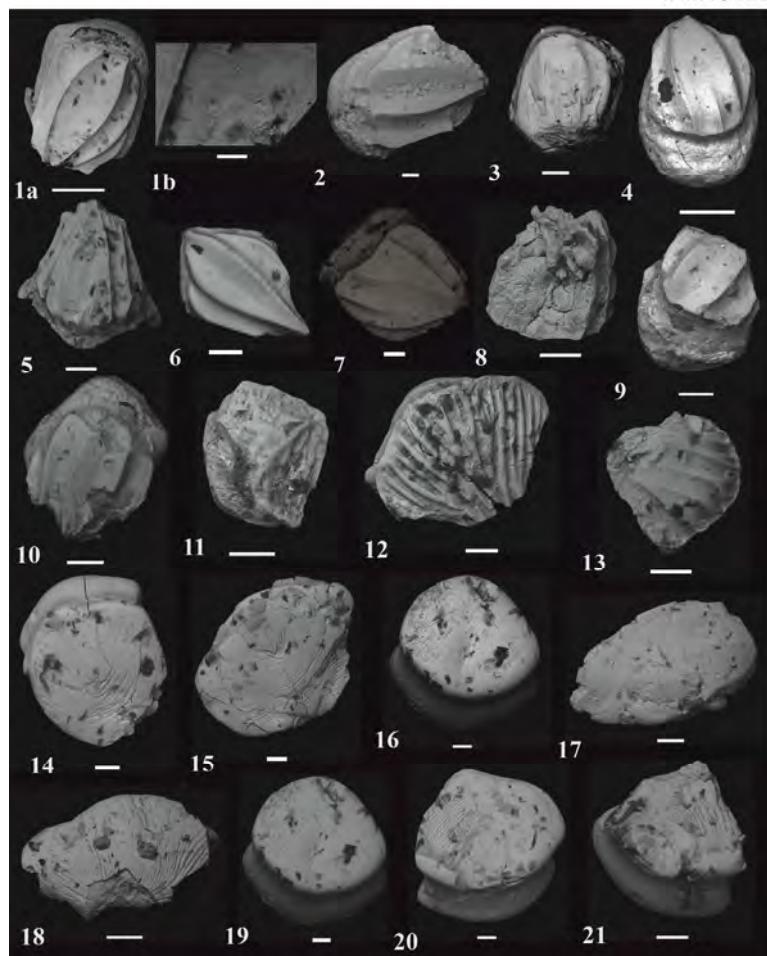


Plate III. Acanthodian scales from the Klimovichi 4n borehole. Scales of acanthodians from the Upper Emsian, Eifelian and Givetian, Lower and Middle Devonian. Scale bar 100 µm for Figures 1b, 2, 6–8, 11–16, 19–21; 200 µm for Figures 3, 5, 9, 10, 17, 18; 500 µm for Figures 1a and 4.

Figure 1 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/4-4, depth of 235.0 m, scale: a – oblique crown view; ×50, b – increased crown view, ×230; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 2 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/4-6, depth of 235.0 m, ×100, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 3 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/4-13, depth of 235.0 m, ×75, scale fragment, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 4 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/5-16, depth of 235.5 m, ×50, scale, anterior crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 5 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/8-4, depth of 237.5 m, ×80, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 6 – *Nostolepis* cf. *gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/4-28, depth of 235.0 m, ×200, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 7 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/5-6, depth of 235.5 m, ×140, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 8 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Specimen № 143/8-8, depth of 237.5 m, ×250, scale, basal view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 9 – *Nostolepis kernavensis* Valiukevičius, 1985. Specimen № 143/11-1, depth of 340.0 m, ×90, scale, oblique crown view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 10 – *Nostolepis kernavensis* Valiukevičius, 1985. Specimen № 143/12-1, depth of 347.5 m, ×85, scale, crown view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 11 – *Diplacanthus* sp. Specimen № 143/8-2, depth of 237.5 m, ×200, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 12 – *Diplacanthus* cf. *tenuistriatus* Traquair, 1894. Specimen № 143/8-3, depth of 237.5 m, ×150, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 13 – *Rhadinacanthus longispinus* (Agassiz, 1844). Specimen № 143/8-10, depth of 237.5 m, ×200, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 14 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/29-2, depth of 487.0 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 15 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/29-3, depth of 487.0 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 16 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-8, depth of 487.8 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 17 – *Diplacanthus* cf. *kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-12, depth of 487.8 m, ×60, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 18 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-13, depth of 487.8 m, ×90, scale fragment, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 19 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-14, depth of 487.8 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 20 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986.

Specimen № 143/30-15, depth of 487.8 m, $\times 100$, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 21 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-16, depth of 487.8 m, $\times 150$, scale fragment, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица III. Чешуи акантодов из скважины Климовичская 4п. Чешуи акантодов из верхнего эмса, эйфеля и живета, нижний и средний девон. Масштабная линейка 100 мкм для фигур 1б, 2, 6–8, 11–16, 19–21; 200 мкм для фигур 3, 5, 9, 10, 17, 18; 500 мкм для фигур 1а и 4.

Фигура 1 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/4-4, глубина 235,0 м, чешуя: а – вид чешуи с наклоном сверху; $\times 50$, б – увеличенный вид участка кроны, $\times 230$; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 2 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/4-6, глубина 235,0 м, $\times 100$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 3 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/4-13, глубина 235,0 м, $\times 75$, фрагмент чешуи, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 4 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/5-16, глубина 235,5 м, $\times 50$, чешуя, вид сверху спереди; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 5 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/8-4, глубина 237,5 м, $\times 80$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 6 – *Nostolepis cf. gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/4-28, глубина 235,0 м, $\times 200$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 7 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/5-6, глубина 235,5 м, $\times 140$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 8 – *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998. Экземпляр № 143/8-8, глубина 237,5 м, $\times 250$, чешуя, вид снизу; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 9 – *Nostolepis kernavensis* Valiukevičius, 1985. Экземпляр № 143/11-1, глубина 340,0 м, $\times 90$, чешуя, вид с наклоном сверху; костюковичский горизонт. Фигура 10 – *Nostolepis kernavensis* Valiukevičius, 1985. Экземпляр № 143/12-1, глубина 347,5 м, $\times 85$, чешуя, вид сверху; костюковичский горизонт. Фигура 11 – *Diplacanthus* sp. Экземпляр № 143/8-2, глубина 237,5 м, $\times 200$, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 12 – *Diplacanthus cf. tenuistratus* Traquair, 1894. Экземпляр № 143/8-3, глубина 237,5 м, $\times 150$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 13 – *Rhadinacanthus longispinus* (Agassiz, 1844). Экземпляр № 143/8-10, глубина 237,5 м, $\times 200$, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 14 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/29-2, глубина 487,0 м, $\times 100$, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 15 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/29-3, глубина 487,0 м, чешуя, $\times 100$, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 16 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-8, глубина 487,8 м, $\times 100$, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 17 – *Diplacanthus cf. kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-12, глубина 487,8 м, $\times 60$, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 18 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-13, глубина 487,8 м, $\times 90$, фрагмент чешуи, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 19 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-14, глубина 487,8 м, $\times 100$, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 20 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-15, глубина 487,8 м, $\times 100$, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 21 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-16, глубина 487,8 м, $\times 150$, фрагмент чешуи, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои

449.0–456.0 м, thickness 7.0 м – Middle Devonian (D₂), Eifelian Stage (D_{2ef}), Lower Eifelian Substage (D_{2ef1}), Adrov Regional Stage (Formation) (D_{2ad}). The carbonate rock strata with increased values of the conventional resistivity in the top part (up to 1.2 $\pi\text{A/kg}$). Two lithological-geophysical members are distinguished within this interval: the upper one is clayey (depth interval of 449.0 to 452.3 m), and the lower one is dolomitic (depth interval of 453.0 to 456.0 m). The clays are greenish-grey, terracotta-brown, dolomitic, fine-cloddy, detrital, uniformly colored, in places, sandy with one small plate fragment of *Guerichosteus heterolepis* (Preobrazhensky, 1911) [6] and two teeth of *Onychodontiformes* indet. The dolomites are grey, pelitomorphic, platy, with thin interlayers of greenish-grey clays, with slightly uneven surface (tuberules are oval in shape, 3–5 mm in size). Light greenish-cream sandy-carbonate oolitic calcareous-dolomitic, sandy rocks occur below. The rocks are massive, in some areas, slightly cavernous, denser. The greenish-grey, thinly laminated clays and light-grey, thin-platy, pelitomorphic dolomites are noted within the interval under consideration. At the end of the interval there are interlayers of greenish-grey clays with tubercles. At the base of the Adrov Regional Stage there are cream, beige-grey dolomites, probably sandy, oolitic. The dolomites are cavernous in some areas; the stylolite surfaces and poikilitic gypsum cement occur there.

422.0–449.0 м, thickness 27.0 м – Middle Devonian (D₂), Eifelian Stage (D_{2ef}), Lower Eifelian Substage (D_{2ef1}), Osveya Regional Stage (Formation) (D_{2os}). the strata of clayey-carbonate-sulfate rocks. The interval under consideration is clearly characterized by a very high apparent resistivity in the interval of 441.6–449.0 m (more than 500 Ohm·m) and the increased γ -activity values in the intervals of 422.0–432.0 m (1.0–1.5 $\pi\text{A/kg}$) and 432.0–441.6 m (0.9–1.2 $\pi\text{A/kg}$). On the basis of the material composition of these rocks and the logging data available this sequence is subdivided into three lithological-geophysical members.

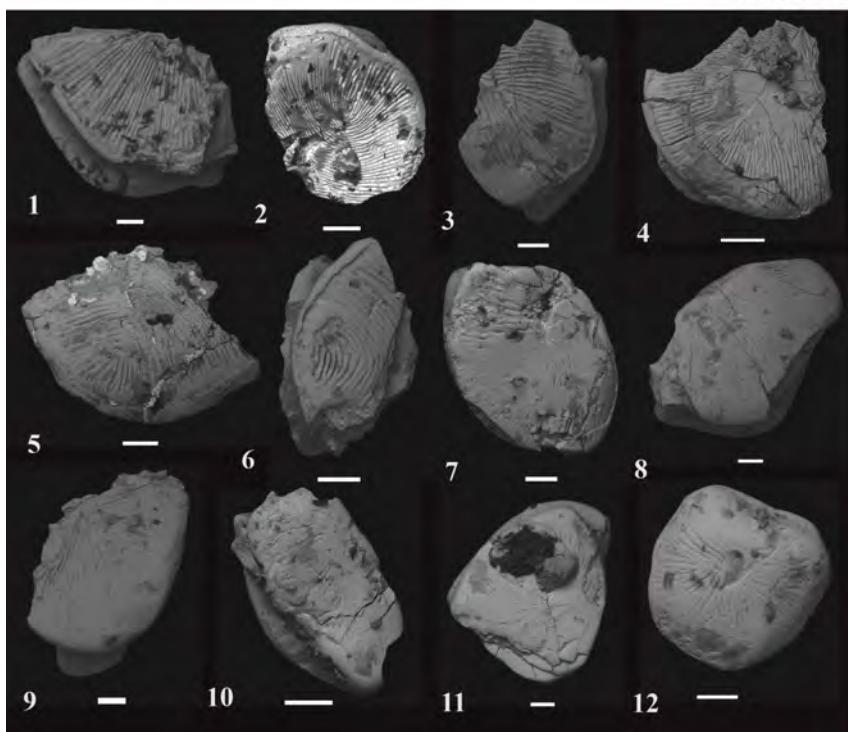
Plate IV

Plate IV. Acanthodian scales from the Klimovichi 4n borehole. Scales of acanthodians from the Upper Emsian, Lower Devonian. Scale bar 100 µm for Figures 1, 3, 5–9, 11, 12; 200 µm for Figures 2, 4, 10.

Figure 1 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-17, depth of 487.8 m, ×100, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 2 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-18, depth of 487.8 m, ×200, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 3 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-37, depth of 487.8 m, ×120, scale fragment, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 4 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-41, depth of 487.8 m, ×90, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 5 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/31-1, depth of 489.8 m, ×130, scale fragment, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 6 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-44, depth of 487.8 m, ×150, scale fragment, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 7 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-20, depth of 487.8 m, ×120, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 8 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-35, depth of 487.8 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 9 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-24, depth of 487.8 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 10 – *Diplacanthus cf. kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-39, depth of 487.8 m, ×90, scale fragment, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 11 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/30-38, depth of 487.8 m, ×100, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 12 – *Diplacanthus cf. kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Specimen № 143/32-5, depth of 497.0 m, ×150, scale, with worn-out crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица IV. Чешуи акантодов из скважины Климовичская 4п. Чешуи акантодов из верхнего эмса, нижний девон. Масштабная линейка 100 µм для фигур 1, 3, 5–9, 11, 12; 200 µм для фигур 2, 4, 10.

Фигура 1 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-17, глубина 487,8 м, ×100, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 2 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-18, глубина 487,8 м, ×200, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 3 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-37, глубина 487,8 м, ×120, фрагмент чешуи, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 4 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-41, глубина 487,8 м, ×90, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 5 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/31-1, глубина 489,8 м, ×130, фрагмент чешуи, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 6 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-44, глубина 487,8 м, ×150, фрагмент чешуи, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 7 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-20, глубина 487,8 м, ×120, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 8 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-35, глубина 487,8 м, ×100, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 9 – *Diplacanthus kleesmentae* Valiukevičius, 1986. Экземпляр № 143/30-24, глубина 487,8 м, ×100, чешуя, с видом на истертую крону; витебский горизонт, обольские

слои. Фигура 10 – *Diplacanthus cf. kleesmentae Valiukevičius*, 1986. Экземпляр № 143/30-39, глубина 487,8 м, ×90, фрагмент чешуи, с видом на истертую корону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 11 – *Diplacanthus kleesmentae Valiukevičius*, 1986. Экземпляр № 143/30-38, глубина 487,8 м, ×100, чешуя, с видом на истертую корону; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 12 – *Diplacanthus cf. kleesmentae Valiukevičius*, 1986. Экземпляр № 143/32-5, глубина 497,0 м, ×150, чешуя, с видом на истертую корону; витебский горизонт, обольские слои

The first member (depth interval of 441.6 to 449.0 m, 7.4 m thick) consists of carbonate-sulphate rocks. The upper part of this interval is composed to more than 50 % of grey gypsum. In the lower part, the proportion of the dolomite material is slightly higher, and gypsum makes up about 45 %. The rocks of this interval show a banded texture, the angle of the rock layers to the core axis varies from 30° to 60°. The gypsum selenite is light grey, while the feldspar gypsum is brownish in color. At the base of the interval there is the brown gypsum occurring as rosettes. There are subvertical pink streaks in the upper part, and white streaks in the lower part. The rock contains a clayey-dolomite component. In the lower part of the member the sandstone is green-grey, inequigranular, predominantly medium-grained, carbonat.

The second member (depth interval of 432.0 to 441.6 m, 9.6 m thick) is composed of the clays, marls and dolomites. The clays are greenish-grey, grey, varying from dolomitic clays to marls, with pelitomorphic, light grey, grey dolomite interlayers, with numerous veinlets of pink gypsum from a few millimeters to 10 cm thick, of subhorizontal and other orientation. The subhorizontal veinlets and nests of transparent brown gypsum matching in color with brown-and-grey clay and pelitomorphic dolomite occur all over the interval, mainly in its lower part.

The third member (depth interval of 422.0 to 432.0 m, 10.0 m thick) is represented by the clays and marls. The clays are grey, in some places, platy, their sand content varying in different extent growing closer to the sandstones, with carbonate cement, with spotted clay interlayers. The marls are massive, platy and splintered. This member of rocks is characterized by the higher amount of the sand component. The section in this interval is sandy, there are some interlayers of the more clayey rocks, as well as rare pink gypsum veinlets.

359.0–422.0 м, thickness 63.0 м – Middle Devonian (D₂), Eifelian Stage (D_{2ef}), Middle Eifelian Substage (D_{2ef2}), Gorodok Regional Stage (Formation) (D_{2gr}): the strata of terrigenous-carbonate rocks. Three peaks of the apparent resistivity values are clearly observed in the middle part of the strata: 120 Ohm·m, 200 Ohm·m and 230 Ohm·m. The strata are easily divided into three lithological-geophysical members.

The first member (depth interval of 403.0 to 422.0 m, 19.0 m thick) is composed of the clayey-marl rocks. In the upper part up to a depth of ~411 m there is a member of frequently intercalated greenish-grey, hydromicaceous, thin-laminated, finely crushed clays, light grey pelitomorphic dolomites and greenish-grey pelitomorphic marls with subhorizontal veinlets of white selenite gypsum and differently oriented veinlets of pink gypsum. The marly-argillaceous rocks predominate in the lower parts of the section. Several layers of the clayey-dolomite rocks enriched in the organic matter occur in this interval. The brecciated clayey-dolomite rocks (0.5 m thick) occur at a depth of ~410 m.

The second member (depth interval of 373.0 to 403.0 m, 30.0 m thick) is represented by the interbedded clays and dolomites. The clays are greenish-grey, dark grey, beige-grey, finely crushed, sometimes, snuff-colored and grey in color, in some places, these are thinly bedded to foliated, with isolated scales of *Ptychodictyon rimosum* Gross, 1973 [5], Osteolepididae gen. indet., teeth of Onychodontiformes indet., Sarcopterygii indet. The dolomites are light grey, grey, dense, pelitomorphic, stratified or unclearly laminated, platy, cavernous in places, with gypsum nests and veinlets, with isolated scales of Sarcopterygii indet, *Moythomasia* ? sp. and Actinopterygii indet.

The third member (depth interval of 359.0 to 373.0 m, 14.0 m thick) consists of the clays, marls and dolomites, alternating in various combinations. The clays are red-brown and greenish-grey, finely gravelly, carbonate-free or weakly dolomitic, with interlayers of marls and calcic-dolomitic rocks. The marls are greenish-grey, wine-colored green-grey, sometimes, spotty-colored ("jasperoid"), massive, dense, hard, with conchoidal fracture, coarsely and coarsely splintered, platy in places, with rare lingulid shells. The dolomites are light grey, greenish grey, pelitomorphic, massive, in places, with a cavernous brecciated texture, or cavernous, with small slickensides.

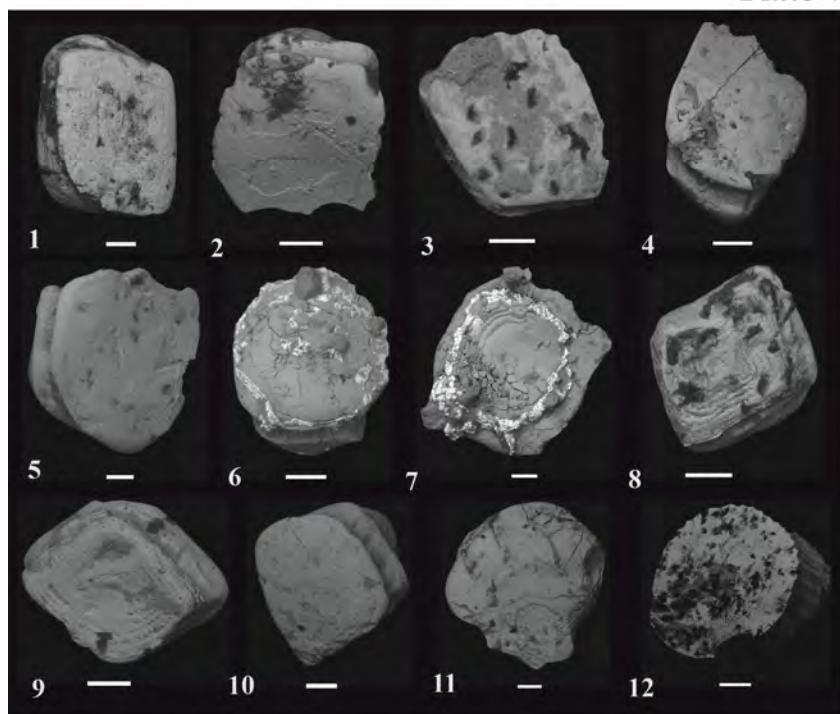
Plate V

Plate V. Acanthodian scales and acanthodian fin spine fragment from the Klimovichi 4n borehole.
Scales and fin spine fragment of the acanthodians from the Upper Emsian, Eifelian and Givetian,
Lower and Middle Devonian. Scale bar 100 µm for Figures 1–3, 5, 7–11; 200 µm for Figures 4, 6, 12.

Figure 1 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/4-10, depth of 235.0 m, ×110, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 2 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/4-21, depth of 235.0 m, ×170, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 3 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/10-1, depth of 339.0 m, ×190, scale, crown view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 4 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/30-9, depth of 487.8 m, ×75, scale fragment, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 5 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/30-22, depth of 487.8 m, ×100, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 6 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/31-2, depth of 489.8 m, ×80, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 7 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/31-5, depth of 489.8 m, ×110, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 8 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/32-4, depth of 497.0 m, ×200, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 9 – *Acanthodes* ? sp. Specimen № 143/32-6, depth of 497.0 m, ×200, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 10 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. Specimen № 143/28-8, depth of 467.5 m, ×150, scale, oblique crown view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 11 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. Specimen № 143/28-10, depth of 467.5 m, ×120, scale, crown view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 12 – *Acanthodii* gen. indet. Specimen № 143/30-32, depth of 487.8 m, ×75, fin spine fragment, oblique top view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица V. Чешуи акантодов и фрагмент плавникового шипа акантода из скважины Климовичская 4п.
Остатки акантодов из верхнего эмса, эйфеля и живета, нижний и средний девон. Масштабная линейка

100 µm для фигур 1–3, 5, 7–11; 200 µm для фигур 4, 6, 12.

Фигура 1 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/4-10, глубина 235,0 м, ×110, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 2 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/4-21, глубина 235,0 м, ×170, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 3 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/10-1, глубина 339,0 м, ×190, чешуя, вид сверху; костюковичский горизонт. Фигура 4 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/30-9, глубина 487,8 м, ×75, фрагмент чешуи, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 5 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/30-22, глубина 487,8 м, ×100, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 6 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/31-2, глубина 489,8 м, ×80, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 7 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/31-5, глубина 489,8 м, ×110, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 8 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/32-4, глубина 497,0 м, ×200, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 9 – *Acanthodes* ? sp. Экземпляр № 143/32-6, глубина 497,0 м, ×200, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 10 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. Экземпляр № 143/28-8, глубина 467,5 м, ×150, чешуя, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 11 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. Экземпляр № 143/28-10, гл. 467,5 м, ×120, чешуя, вид сверху; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 12 – *Acanthodii* gen. indet. Экземпляр № 143/30-32, глубина 487,8 м, ×75, фрагмент плавникового шипа, вид с наклоном сверху; витебский горизонт, обольские слои

334.7–359.0 m, thickness 24.3 m – Middle Devonian (D₂), Eifelian Stage (D_{2ef}), Upper Eifelian Substage (D_{2ef3}), Kostuykovichi Regional Stage (Formation) (D_{2ks}): the strata are represented by variously colored clays, clayey marls and marls. The increased γ-activity values were recorded over the strata reaching 1.6–2.8 $\mu\text{A/kg}$. The values of the conventional resistivity range from 5 to 30 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$. The strata are subdivided into two lithological-geophysical members.

The first member (depth interval of 350.0 to 359.0 m, 9.0 m thick) is represented by the clays, marls and dolomites. The clays are argillite-like, grey, lilac-brownish-green, lilac-grey, mustard-yellow-grey, platy, massive, dense, unclearly laminated, poorly dolomitic, or non-carbonate, or slightly carbonate, with pyritized and coalified plant remains. The marls are light grey, lilac-brownish-green, patchy, dense, platy, with a nuchal plate of *Asterolepis* sp. and a plate fragment from the pectoral fin of *Asterolepis cf. estonica* Gross, 1940 [7], a small plate fragment of Coccosteidae gen. indet., teeth of Onychodontiformes indet. The dolomites are light grey, pelitomorphic, in some places, micro-fine-crystalline, hard, platy.

The second member (depth interval of 334.7–350.0 m, 15.3 m thick) consists of the clays, clayey marls and marls. The clays are grey, pale-grey, lilac-grey, beige-grey, platy, stratified, unclearly laminated, massive, in some areas (in the depth interval of 335.7 to 338.5 m) with a silt material admixture. Single-color clays include large plant remains. In some part of the clays the slickensides are observed. The clayey marls are grey, light grey, dark grey, in places, with brown spots, with a conchoidal fracture, dense, with sulfide inclusions in the form of small crystals, grains, nodules, with some microgastropods, bivalves, small fragments of lingulids, remains of Placodermi indet., small plates of Coccosteidae gen. indet., teeth of Onychodontiformes indet., scales of *Nostolepis kernavensis* Valiukevičius, 1985 [8], *Acanthodes* ? sp., two fragmentary scales of Osteolepididae gen. indet. The marls are grey, light grey, not layered, dense, platy, massive, in places, with glide bedding, with rare small fragments of the lingulid shells and very few plant remains.

254.0–334.7 m, thickness 80.7 m – Middle Devonian (D₂), Givetian Stage (D_{2g}), Lower Givetian Substage (D_{2g1}), Polotsk Regional Stage (Formation) (D_{2pl}), Goryn Beds (D_{2grn}): the strata of the interbedded sandstones, siltstones, argillaceous-silty rocks and clays. The logging diagram is saw-shaped. The highest γ-activity values were recorded in the middle part of the strata. These values reach 2.2–2.4 $\mu\text{A/kg}$. The highest values of the conventional resistivity are determined at the boundaries of three members and range from 80 to 100 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$.

The first member (depth interval of 316.0 to 334.7 m, 18.7 m thick) is represented by the siltstones and clays. The siltstones are light grey, greenish-grey, brownish-brown, mustard-yellow, fine-grained, with various mica content, with impregnation of the iron sulfides and hydroxides, dense, platy, with fragments of plant remains. The clays are grey, brown-brown, dense, platy.

The second member (depth interval of 283.8 to 316.0 m, 32.2 m thick) is composed of the intermittent siltstones, clays, and clayey-silty rocks. The siltstones are greenish-grey, grey, brown, lilac, mottled, non-carbonate; in some places, there are isolated interlayers of ocherous, greenish-grey, quartzitic, medium-grained, micaceous, porous, loose sandstones. The clays are lilac-grey, greenish-grey, lilac-grey, terracotta, pale-grey colored, massive, unclearly laminated, in some intervals, with the slickensides, non-carbonate, sometimes, laminated. The clayey-silt rocks are greenish-lilac, grey, red-brown, lilac, pale, noncarbonate, the clays are predominantly silty with various amounts of silt, green-lilac and red-brown in color with ochre spots. The silty rock varieties occur as thin layers (about 10 cm thick), these are platy, massive. The color distribution depends on the content of the clayey and silty components.

The third member (depth interval of 254.0 to 283.8 m, 29.8 m thick) consists of the sandstones, siltstones and clays. The sandstones are greenish-grey, light grey, fine-grained, with clayey-carbonate cement, platy. The siltstones are green-grey, terracotta-brown, platy, micaceous, non-carbonate or slightly carbonate, coarse-platy, with clayey and clayey-dolomitic cement. The clays are argillite-like, light grey, green-grey, wine-colored and lilac, terracotta, sealing wax-colored, lilac, mottled, spotted, in places, with ochreous spots, in some parts - with slickensides, massive, sometimes, coarse-platy, non-carbonate and dolomitic.

187.0–254.0 m, thickness 67.0 m – Middle Devonian (D₂), Givetian Stage (D_{2g}), Lower and Middle Givetian Substage (D_{2g1-2}), Polotsk Regional Stage (Formation) (D_{2pl}), Stolin Beds (D_{2stl}): the strata of interbedded sandstones, sands, siltstones and clays. Two peaks of the γ-activity (2.8 and 5.0 $\mu\text{A/kg}$) were recorded in the sequence at depths of 189.0 m and 200.0 m, as well as one peak of the conventional resistivity (280 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$) at a depth of 228.0 m. On the basis of the geophysical logging and lithological data the strata can be easily divided into three lithological-geophysical members.

Plate VI

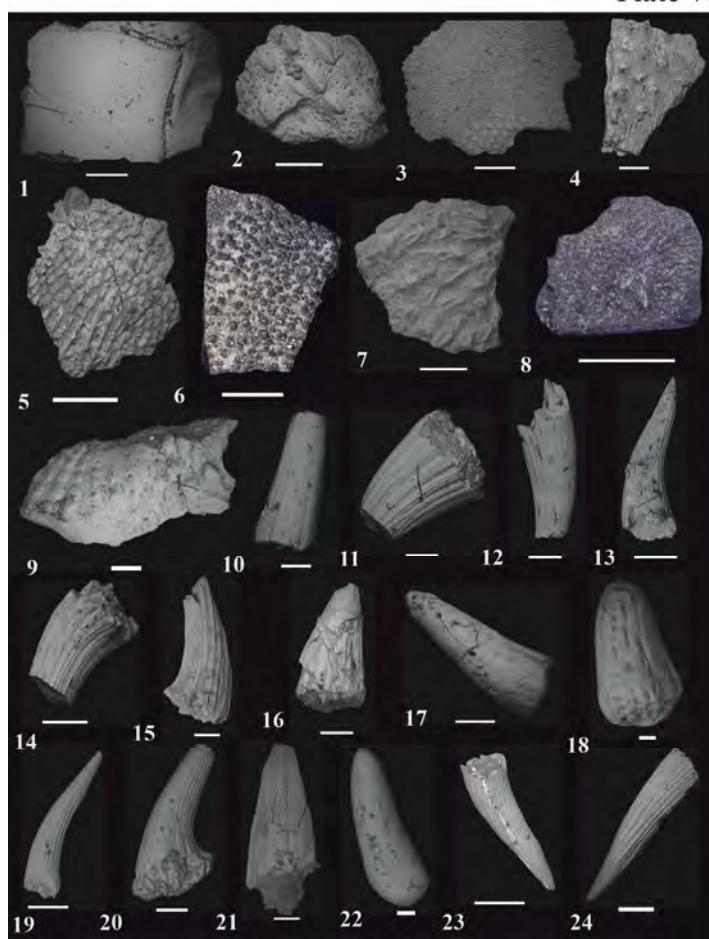


Plate VI. Sarcopterygian remains from the Klimovichi 4n borehole. The sarcopterygians remains from the Upper Emsian, Eifelian and Givetian, Lower and Middle Devonian. Scale bar 200 µm for Figures 12, 15, 18, 22; 500 µm for Figures 4, 7, 9–11, 13, 14, 16, 17, 19–24; 1 mm for Figures 1–3, 5; 5 mm for Figures 6 and 8.

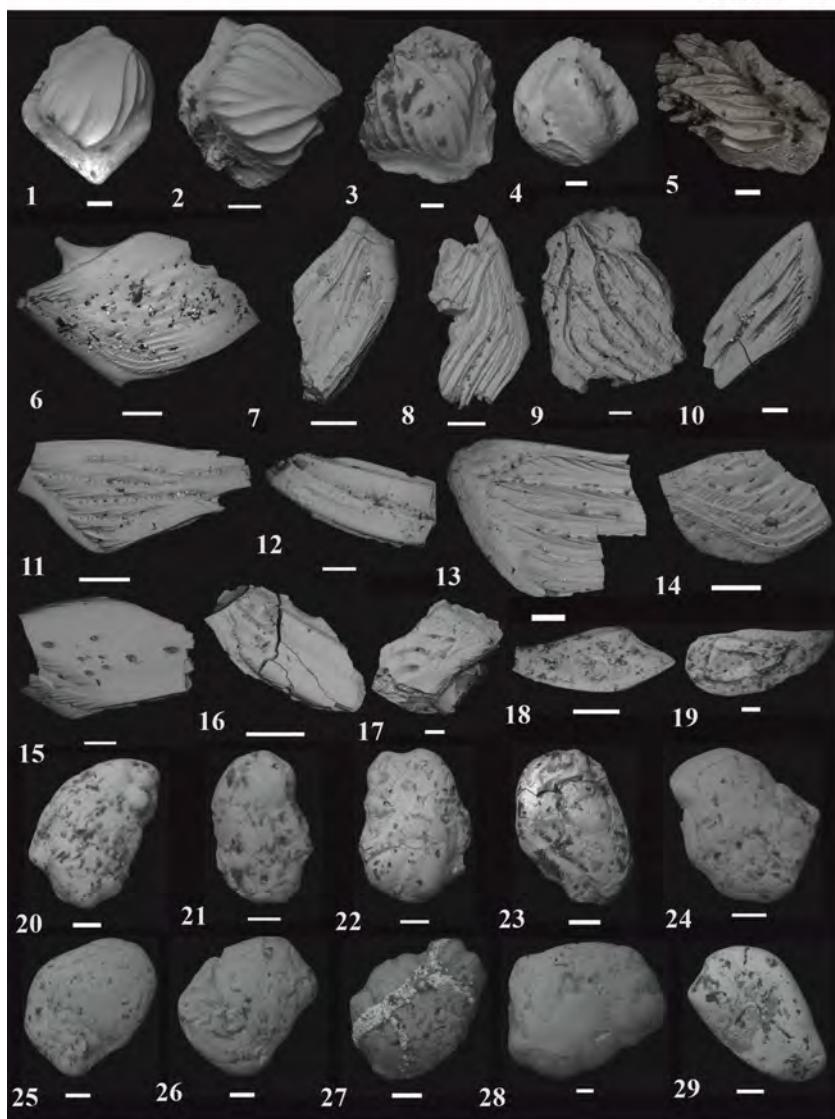
Figure 1 – Osteolepididae gen. indet. Specimen № 143/5-23, depth of 235.5 m, ×25, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 2 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/5-22, depth of 235.5 m, ×25, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 3 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/28-1, depth of 467.5 m, ×25, scale fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 4 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/28-2, depth of 467.5 m, ×33, scale fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 5 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/28-3, depth of 467.5 m, ×25, scale fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 6 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/28-20, depth of 467.5 m, scale fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 7 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/28-16, depth of 467.5 m, ×50, scale fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 8 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/28-21, depth of 467.5 m, bone fragment, external view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 9 – Dipteridae gen. indet. Specimen № 143/6-1, depth of 236.2 m, ×27, tooth plate; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 10 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/5-24, depth of 235.5 m, ×30, tooth, lateral view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 11 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/5-25, depth of 235.5 m, ×40, tooth, lateral view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 12 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/5-26, depth of 235.5 m, ×70, tooth, lateral view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 13 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/10-2, depth of 339.0 m, ×50, tooth, lateral view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 14 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/17-1, depth of 357.5 m, ×50, tooth, lateral view; Kostyukovichi Regional Stage. Figure 15 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/28-12, depth of 467.5 m, ×90, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 16 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/28-13, depth of 467.5 m, ×37, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 17 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/28-14, depth of 467.5 m, ×50, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 18 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/28-15, depth of 467.5 m, ×60, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Lepel Beds. Figure 19 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/30-28, depth of 487.8 m, ×50, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 20 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/30-29, depth of 487.8 m, ×40, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 21 – Porolepiformes indet. Specimen № 143/30-30, depth of 487.8 m, ×33, tooth; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 22 – Sarcopterygii indet. Specimen № 143/30-31, depth of 487.8 m, ×65, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 23 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/31-4, depth of 489.8 m, ×50, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 24 – Onychodontiformes indet. Specimen № 143/32-1, depth of 497.0 m, ×40, tooth, lateral view; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица VI. Остатки саркоптеригий из скважины Климовичская 4п.**Остатки саркоптеригий из верхнего эмса, эйфеля и живета, нижний и средний девон.****Масштабная линейка 200 μm для фигур 12, 15, 18, 22; 500 μm для фигур 4, 7, 9–11, 13, 14, 16, 17, 19–24;
1 мм для фигур 1–3, 5; 5 мм для фигур 6 и 8.**

Фигура 1 – Osteolepididae gen. indet. Экземпляр № 143/5-23, глубина 235,5 м, $\times 25$, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 2 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/5-22, глубина 235,5 м, $\times 25$, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 3 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/28-1, глубина 467,5 м, $\times 25$, фрагмент чешуи, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 4 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/28-2, глубина 467,5 м, $\times 33$, фрагмент чешуи, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 5 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/28-3, глубина 467,5 м, $\times 25$, фрагмент чешуи, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 6 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/28-20, глубина 467,5 м, фрагмент чешуи, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 7 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/28-16, глубина 467,5 м, $\times 50$, фрагмент чешуи, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 8 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/28-21, глубина 467,5 м, дермальный костный фрагмент, вид снаружи; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 9 – Dipteridae gen. indet. Экземпляр № 143/6-1, глубина 236,2 м, $\times 27$, зубная пластишка; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 10 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/5-24, глубина 235,5 м, $\times 30$, зуб, вид сбоку; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 11 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/5-25, глубина 235,5 м, $\times 40$, зуб, вид сбоку; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 12 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/5-26, глубина 235,5 м, $\times 70$, зуб, вид сбоку; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 13 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/10-2, глубина 339,0 м, $\times 50$, зуб, вид сбоку; костюковичский горизонт. Фигура 14 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/17-1, глубина 357,5 м, $\times 50$, зуб, вид сбоку; костюковичский горизонт. Фигура 15 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/28-12, глубина 467,5 м, $\times 90$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 16 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/28-13, глубина 467,5 м, $\times 37$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 17 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/28-14, глубина 467,5 м, $\times 50$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 18 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/28-15, глубина 467,5 м, $\times 60$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, лепельские слои. Фигура 19 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/30-28, глубина 487,8 м, $\times 50$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 20 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/30-29, глубина 487,8 м, $\times 40$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 21 – Porolepiformes indet. Экземпляр № 143/30-30, глубина 487,8 м, $\times 33$, зуб; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 22 – Sarcopterygii indet. Экземпляр № 143/30-31, глубина 487,8 м, $\times 65$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 23 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/31-4, глубина 489,8 м, $\times 50$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 24 – Onychodontiformes indet. Экземпляр № 143/32-1, глубина 497,0 м, $\times 40$, зуб, вид сбоку; витебский горизонт, обольские слои

The first member (depth interval of 233.2 to 254.0 m, 20.8 m thick) consists of sandstones, siltstones and clays. The sandstones are light grey, beige-grey, greenish-grey, whitish, fine- and fine-grained, quartzy, feldspar-quartzy, micaceous, well cemented, with carbonate-argillaceous cement, massive, dense, unclearly laminated, locally stratified or brecciated, platy, in places, with plant detritus, with some few small fragments of the lingulid shells and numerous ichthyofauna remains represented by the psammosteid tubercles and small fragments of the plates of *Psammolepis* sp., *Pycnosteus* sp., *Ganosteus* sp., Psammosteoidae indet., placoderm fragmentary plates of *Asterolepis* sp., *Euarthrodira* indet., *Placodermi* indet., rounded scales of *Holonema* ? sp., acanthodian scales of *Diplacanthus* sp., *D. cf. tenuistriatus* Traquair, 1894 [9], *Rhadinacanthus longispinus* (Agassiz, 1844) [10], *Cheiracanthus* sp., *C. latus* Egerton, 1861 [11], *C. brevicostatus* Gross, 1973 [5], *C. intricatus* Valiukevičius, 1985 [8], *Nostolepis gaujensis* Valiukevičius, 1998 [12], *N. cf. gaujensis* Valiukevičius, *Acanthodes* ? sp., some fragments of the fin spines of *Diplacanthus* sp., *Acanthodii* gen. indet., tooth plate of *Dipteridae* gen. indet., sarcopterygian teeth and scales of *Glyptolepis* sp., Osteolepididae gen. indet., Onychodontiformes indet., Porolepiformes indet., Sarcopterygii indet. and actinopterygian scales of *Cheirolepis* sp., *Orvikina* sp., *Moythomasia* ? sp., Actinopterygii indet. The siltstones are light grey, greenish grey, brown, maroon, dense, indistinctly or thinly bedded, platy. The clays are mottled, grey, light grey, green-brown, grey-brown, green-purple, lilac-grey, in places, with mustard-yellow spots, layered, unclearly laminated, non-carbonate.

Plate VII



**Plate VII. Actinopterygian scales and fish otoliths from the Klimovichi 4n borehole.
The fish remains from the Upper Emsian and Givetian, Lower and Middle Devonian.
Scale bar 100 µm for Figures 1–5, 28; 200 µm for Figures 9, 10, 13, 15, 17, 19–27, 29;
500 µm for Figures 6–8, 11, 12, 14, 16, 18.**

Figure 1 – *Cheirolepis* sp. Specimen № 143/4-2, depth of 235.0 m, ×100, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 2 – *Cheirolepis* sp. Specimen № 143/4-5, depth of 235.0 m, ×150, scale, crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 3 – *Cheirolepis* sp. Specimen № 143/4-8, depth of 235.0 m, ×100, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 4 – *Cheirolepis* sp. Specimen № 143/4-7, depth of 235.0 m, ×130, scale, basal view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 5 – *Cheirolepis* sp. Specimen № 143/5-5, depth of 235.5 m, ×150, scale, oblique crown view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 6 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/4-12, depth of 235.0 m, ×33, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 7 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/4-14, depth of 235.0 m, ×37, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 8 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/4-16, depth of 235.0 m, ×30, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 9 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/4-17, depth of 235.0 m, ×55, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 10 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/4-19, depth of 235.0 m, ×55, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 11 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/4-18, depth of 235.0 m, ×35, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 12 – *Orvikuna* sp. Specimen № 143/4-26, depth of 235.0 m, ×30, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 13 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/5-13, depth of 235.5 m, ×80, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 14 – *Moythomasia* ? sp. Specimen № 143/5-14, depth of 235.5 m, ×50, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 15 – Actinopterygii indet. Specimen № 143/5-15, depth of 235.5 m, ×65, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 16 – Actinopterygii indet. Specimen № 143/5-18, depth of 235.5 m, ×50, scale fragment, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 17 – Actinopterygii indet. Specimen № 143/5-17, depth of 235.5 m, ×60, scale fragment, external view; Polotsk

Regional Stage, Stolin Beds. Figure 18 – *Actinopterygii* indet. Specimen № 143/8-1, depth of 237.5 m, ×45, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 19 – *Actinopterygii* indet. Specimen № 143/8-5, depth of 237.5 m, ×65, scale, external view; Polotsk Regional Stage, Stolin Beds. Figure 20 – Otolith. Specimen № 143/30-6, depth of 487.8 m, ×70, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 21 – Otolith. Specimen № 143/30-7, depth of 487.8 m, ×75, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 22 – Otolith. Specimen № 143/30-10, depth of 487.8 m, ×70, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 23 – Otolith. Specimen № 143/30-19, depth of 487.8 m, ×80, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 24 – Otolith. Specimen № 143/30-23, depth of 487.8 m, ×75, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 25 – Otolith. Specimen № 143/30-25, depth of 487.8 m, ×70, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 26 – Otolith. Specimen № 143/30-26, depth of 487.8 m, ×70, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 27 – Otolith. Specimen № 143/31-3, depth of 489.8 m, ×85, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 28 – Otolith. Specimen № 143/30-43, depth of 487.8 m, ×100, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds. Figure 29 – Otolith. Specimen № 143/32-3, depth of 497.0 m, ×70, good preservation; Vitebsk Regional Stage, Obol Beds

Фототаблица VII. Чешуи актиноптеригий и отолиты рыб из скважины Климовичская 4п.

Остатки рыб из верхнего эмса и живета, нижний и средний девон.

**Масштабная линейка 100 мкм для фигур 1–5, 28, 200 мкм для фигур 9, 10, 13, 15, 17, 19–27, 29;
500 мкм для фигур 6–8, 11, 12, 14, 16, 18.**

Фигура 1 – *Cheirolepis* sp. Экземпляр № 143/4-2, глубина 235,0 м, ×100, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 2 – *Cheirolepis* sp. Экземпляр № 143/4-5, глубина 235,0 м, ×150, чешуя, вид сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 3 – *Cheirolepis* sp. Экземпляр № 143/4-8, глубина 235,0 м, ×100, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 4 – *Cheirolepis* sp. Экземпляр № 143/4-7, глубина 235,0 м, ×130, чешуя, вид снизу; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 5 – *Cheirolepis* sp. Экземпляр № 143/5-5, глубина 235,5 м, ×150, чешуя, вид с наклоном сверху; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 6 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/4-12, глубина 235,0 м, ×33, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 7 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/4-14, глубина 235,0 м, ×37, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 8 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/4-16, глубина 235,0 м, ×30, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 9 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/4-17, глубина 235,0 м, ×55, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 10 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/4-19, глубина 235,0 м, ×55, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 11 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/4-18, глубина 235,0 м, ×35, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 12 – *Orvikuina* sp. Экземпляр № 143/4-26, глубина 235,0 м, ×30, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 13 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/5-13, глубина 235,5 м, ×80, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 14 – *Moythomasia* ? sp. Экземпляр № 143/5-14, глубина 235,5 м, ×50, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 15 – *Actinopterygii* indet. Экземпляр № 143/5-15, глубина 235,5 м, ×65, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 16 – *Actinopterygii* indet. Экземпляр № 143/5-18, глубина 235,5 м, ×50, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 17 – *Actinopterygii* indet. Экземпляр № 143/5-17, глубина 235,5 м, ×60, фрагмент чешуи, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 18 – *Actinopterygii* indet. Экземпляр № 143/8-1, глубина 237,5 м, ×45, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 19 – *Actinopterygii* indet. Экземпляр № 143/8-5, глубина 237,5 м, ×65, чешуя, вид снаружи; полоцкий горизонт, столинские слои. Фигура 20 – Отолит. Экземпляр № 143/30-6, глубина 487,8 м, ×70; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 21 – Отолит. Экземпляр № 143/30-7, глубина 487,8 м, ×75; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 22 – Отолит. Экземпляр № 143/30-10, глубина 487,8 м, ×70; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 23 – Отолит. Экземпляр № 143/30-19, глубина 487,8 м, ×80; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 24 – Отолит. Экземпляр № 143/30-23, глубина 487,8 м, ×75; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 25 – Отолит. Экземпляр № 143/30-25, глубина 487,8 м, ×70; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 26 – Отолит. Экземпляр № 143/30-26, глубина 487,8 м, ×70; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 27 – Отолит. Экземпляр № 143/31-3, глубина 489,8 м, ×85; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 28 – Отолит. Экземпляр № 143/30-43, глубина 487,8 м, ×100; витебский горизонт, обольские слои. Фигура 29 – Отолит. Экземпляр № 143/32-3, глубина 497,0 м, ×70; витебский горизонт, обольские слои

The second member (depth interval of 200.9 to 233.2 m, 32.3 m thick) is represented by the sandstones, sands and clays. The sandstones are grey, light grey, green-grey, pink-beige, quartzitic, feldspar-quartzitic, fine- and medium-grained, in some places, coarse-grained growing to gravelstones, unsorted, with clayey, clayey-carbonate or carbonate cement, with mica powders and lenses of green-grey clayey material, as well as with areas, where the carbonized plant residues occur on bedding surfaces. The sands are light grey, beige-grey, fine-grained, quartzitic, well sorted, in some areas the signs of layering (green-grey and grey layers). In the upper part of the member, the sands are very fine. The sands react very poorly with HCl. They sometimes also include rare inclusions of the carbonized plant remains. The siltstones are grey, greenish-grey, dark grey, fine-grained, with clay-carbonate cement, micaceous, indistinctly bedded, in places, with thin horizontal bedding. The clays are light grey, grey, greenish – grey, dark grey, dense.

The third member (depth interval of 187.0 to 200.9 m, 13.9 m thick) is composed of siltstones, clays and coals. The clays are greenish-grey, brownish-grey, beige-grey, in some places, with a slight ocher shade, in some places, sandy-silty, dense, platy, to different degrees, layered, non-carbonate, lumpy, crushed stone, or platy, in places, with siderite, as well as with pyritized or carbonized plant remains. The siltstones are light grey, beige-grey with greenish hue in the upper part of the member, micaceous, with carbonate cement. The rocks vary from the clearly laminated to unclearly laminated ones, are horizontally thin-layered, coarse-platy. The coal is black, brownish-black, light, high-ash, with powders of fine silty-clayey matter over the layering, thinly foliated, thin-layered. The coal mineral base is predominantly clayey, with an admixture of silty material. Flattened sulfide concretions up to a few centimeters in thickness and thin brown interlayers with an admixture of the sapropel material are noted. The upper part of the member contains the higher clay amount. The bottom part shows thin greenish-grey interbeds of clay, large coalified plant remains and sulfide concretions. The ash content of coal is 46–64%.

175.0–187.0 m, thickness 12.0 m – Middle Devonian (D₂), Givetian Stage (D_{2g}), Middle Givetian Substage (D_{2g2}), Polotsk Regional Stage (Formation) (D_{2pl}), Moroch Beds (D_{2mr}): the strata of interbedded sandstones, siltstones and clays. The gamma ray values are moderate, and the conventional resistivity is high. The γ-activity values over the considered strata range from 0.4 to 1.2 $\mu\text{A}/\text{kg}$, and the conventional resistivity values vary from 80 to 160 Ωm . The strata are divided into two lithological and geophysical members.

The first member (depth interval of 178.8 to 187.0 m, 8.2 m thick) consists of the sandstones, siltstones and clays. The sandstones are grey, light grey, greenish-grey, whitish fine-grained, quartzitic, feldspar-quartzitic, slightly micaceous, with carbonate or clayey-carbonate cement, massive, platy, unclearly laminated, in some areas, with layering emphasized by the subparallel orientation of thin sinuous cutting interbeds enriched in clay matter and by some isolated muscovite and hydrobiotite folia. The siltstones are grey, light grey, beige-grey, predominantly non-carbonate, massive, poorly cemented, in some areas, with ocherous and red-brown oxidation spots, sometimes, with small siderite pockets. The clays are greenish-grey, with different silt content, platy-rubble, non-carbonate.

The second member (depth interval of 175.0 to 178.8 m, 3.8 m thick) is represented by the sandstones and clays. The sandstones are variegated (red-brown and ochreous in color), mostly fine-grained, poorly cemented, platy, with some single small scale fragments of Porolepiformes indet. The clays are variegated and unevenly colored in red-brown and mustard-yellow; the red-brown color being dominant. The rocks are massive, non-carbonate or weakly dolomitic with different amounts of the sandy-silt component. The clay includes siderite. The clayey component is composed of kaolinite, hydromica. The clastic material is represented by the quartz and feldspar.

166.0–175.0 m, thickness 9.0 m – Middle Devonian (D₂), Givetian Stage (D_{2g}), Upper Givetian Substage (D_{2g3}), Lan Regional Superstage (D_{2ln}), Ubort Regional Stage (D_{2ub}), Khotimsk Formation (D_{2kht}): a stratum of interbedded sandstones, siltstones and clays. Over this stratum the γ-activity value varies from 0.5 to 1.4 $\mu\text{A}/\text{kg}$, and the conventional resistivity values vary from 30 to 90 Ωm with one peak up to 240 Ωm at a depth of 175.0 m. This stratum is well subdivided into two lithological and geophysical members.

The first member (depth interval of 169.0 to 175.0 m, 6.0 m thick) is represented by the sandstones, siltstones and clays. The sandstones are light grey, grey, feldspar-quartzitic, fine-grained, micaceous, carbonate, finely cavernous, with a drainage structure, massive, with wavy, oblique, cross-oblique bedding, with the iron sulfide dissemination. The siltstones are light grey with brownish-red spots of oxidation, massive, platy, non-carbonate, weakly micaceous. The clays are silty, unevenly colored: mustard-yellow and ochreous clays dominate, and the light grey ones occur as spots.

The second member (depth interval of 166.0 to 169.0 m, 3.0 m thick) consists of light grey clays with rare ochreous spots of oxidation, non-carbonate, silty, dense, with siderite grains.

In the upper part the Ubort deposits are overlain by the terrigenous rocks of the Zhelon Regional Stage of the Frasnian Stage of the Upper Devonian, which are not dealt with in this paper.

CORRELATION OF THE STRATIGRAPHIC UNITS DISTINGUISHED IN THE STUDIED BOREHOLE

The deposits of the Obol and Lepel Beds of the Vitebsk Regional Stage (Formation) of the Upper Emsian in the territory of Belarus correspond in their thelodont content to the *Skamolepis fragilis* zone, and in their acanthodians remains to the *Laliacanthus singularis* zone [12–17]. Unfortunately, no zonal species were found in the deposits of the Vitebsk Regional Stage of the studied borehole, but an ichthyological assemblage characteristic of this stratigraphic level was identified. According to this assemblage the deposits of the Vitebsk Regional Stage (Formation) are correlated with the sediments of the Rezēkne Regional Stage (Formation) of the Baltic States [18–20] and the Novobasovo Beds of the Ryazhsk Regional Stage (Formation) of the central part of the East European Platform [20–22].

The deposits of the Adrov Regional Stage (Formation) of the Lower Eifelian Substage of the Eifelian Stage distinguished in the studied borehole correspond in their heterostracans to the *Guerichosteus heterolepis* zone [23]. These are correlated in their ichthyofauna remains with the deposits of the Pärnu Regional Stage (Formation) of the Main Devonian Field [17, 19, 20, 24] and with the sediments of the Osetrov Beds of the Ryazhsk Regional Stage (Formation) in the territory of the Central Devonian Field [21].

Unfortunately, the ichthyofauna remains were not found in the deposits of the Osveya Regional Stage (Formation) of the Lower Eifelian Substage of the Eifelian Stage of the Klimovichi 4п borehole, therefore, their Osveya age was determined from the rock occurrence in the section, their material composition and correlation with the sediments from the other boreholes drilled earlier within the territory under study. Within Belarus the deposits of the Osveya Regional Stage (Formation) correspond in their acanthodians to the *Cheiracanthoides estonicus* zone [12, 14–16, 25]. These are well correlated with the deposits of the Vadja Regional Substage (Formation) of the Narva Regional Stage of Lithuania [8, 13, 17, 20] and are also well correlated with the rocks of the Dorogobuzh Regional Stage (Formation) of the central part of Russia [21].

The rocks of the Gorodok Regional Stage (Formation) of the Middle Eifelian Substage of the Eifelian Stage distinguished in the studied borehole correspond to the *Ptychodictyon rimosum* acanthodian zone [12–16, 25] and are correlated with the deposits of the Leivu Regional Substage (Formation) of the Narva Regional Stage of Lithuania, as well as with the Klintsov and Mosolovo Regional Stages (Formations) in the territory of the central part of Russia [13, 17, 21, 20, 24].

The deposits of the Kostyukovich Regional Stage (Formation) of the Upper Eifelian Substage of the Eifelian Stage established in the studied borehole correspond to the *Nostolepis kernavensis* acanthodian zone [14–16, 20, 25]. These are correlated in their ichthyofauna composition with the sediments of the Kernavė Regional Substage (Formation) of the Narva Regional Stage of the Baltic States [13, 17, 19, 24], with deposits of the Veliky Most Subformation of the lower part of the Lopushany Formation of the Eifelian Stage in the Volyn-Podolia Region [26], with the rocks of the Chernyi Yar Regional Stage (Formation) of the central part of the East European Platform [20, 21], and the Kolva Regional Stage (Lekeiyaga Formation) of the Timan-Pechora Region [20, 27].

The deposits of the Polotsk Regional Stage (Formation) of the Lower and Middle Givetian Substages distinguished in the studied borehole in the territory of Belarus correspond to the *Diplacanthus gravis* acanthodian zone [14–16, 20, 25]. In the studied borehole the vertebrates characteristic of this stratigraphic level were found, as well as the miospores, which allow us to correlate these deposits with the sediments of the Aruküla and Burtneiki Regional Stages of the Main Devonian Field [17, 19, 28], with deposits the Vorob'ev, Ardatov and Mullin Regional Stages of the central regions of the East European Platform [20] and within the Volyn-Podolia Region - with the Podilipets Subformation of the upper part of the Lopushany Formation, the Pelcha, Kryzhov and Batyatych Formations of the Givetian Stage [26].

No ichthyofaunistic material was found in the deposits of the Ubort Regional Stage (Khotimsk Formation) of the Upper Givetian Substage of the Klimovichi 4п borehole, which would help the authors to make their correlation with the same age deposits widespread in the adjacent territories. It should only be noted that the substantiation of the age of these deposits was carried out by V. Yu. Obukhovskaya on the basis of their miospore content.

Conclusions.

1. A detailed stratigraphic subdivision of the Klimovichi 4п borehole section was made on the basis of their lithological, palaeoichthyological, geological and geophysical data. Some separate lithological-geophysical members were also distinguished in the section of this borehole.

2. Representative ichthyofauna assemblages were identified in the rocks of the studied borehole at some stratigraphic levels.

3. The correlation of the deposits from the established regional and local stratigraphic units with the well-studied synchronous deposits in the adjacent territories of Lithuania, Latvia, Russia and Ukraine is presented.

4. The results obtained in this research have to be used in the future during large-scale geological surveys within the studied area.

Acknowledgements. The authors of the paper are sincerely grateful to Dr. O. F. Kuzmenkova and T. Ph. Sachenko (The "Institute of Geology" Branch of the State Enterprise "Research and Production Centre for Geology", Minsk, Belarus) for the geological and geophysical information about the studied borehole and some core material provided, the authors express their deep gratitude to Dr. C. Burrow (University of Queensland, Queensland, Australia), Prof. Dr. E. Lukševičs (University of Latvia, Riga, Latvia), Dr. O. A. Lebedev (Orlov Palaeontological Museum of the Borissiak Palaeontological Institute of Russian Academy of Sciences) for their helpful discussions about some ichthyofauna taxa definitions, as well as to V. G. Lugin (Belarusian State Technological University, Center for Physical and Chemical Investigations, Minsk, Belarus) for his help with the electron microscope photography, to D. A. Stepanenko for taking pictures of some vertebrate macroremains, and to V. G. Filippova for her help in editing the English version of the paper.

Благодарности. Авторы статьи искренне признательны к.г.-м.н. О. Ф. Кузьменковой и научному сотруднику Т. Ф. Саченко (Филиал «Институт геологии» Государственного предприятия «Научно-производственный центр по геологии», Минск, Беларусь) за предоставленную геолого-геофизическую информацию по исследуемой скважине и керновый материал. Также авторы выражают глубокую благодарность д-ру К. Берроу (Университет Квинсленда, Квинсленд, Австралия), проф. д-ру Э. Лукшевичу (Латвийский университет, Рига, Латвия), к.б.н. О. А. Лебедеву (Палеонтологический музей им. Ю. А. Орлова, Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка РАН) за полезные обсуждения определений некоторых таксонов ихтиофауны, а также В. Г. Лугину (Белорусский государственный технологический университет, Центр физико-химических исследований, Минск, Беларусь) за помощь в фотографировании на электронном микроскопе, Д. А. Степаненко за фотографирование макроостатков некоторых позвоночных, а также В. Г. Филипповой за помощь в редактировании английской версии статьи.

References

1. Makhnach A. S. [et al.]. *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Minsk, 2001, 815 p. (in Russian)
2. Obukhovskaya T. G. [et al.]. *Devonskaya sistema* [The Devonian system]. Stratigraphic Charts of the Precambrian and Phanerozoic deposits of Belarus : explanatory note. Minsk, 2010, pp. 98–114. (in Russian)
3. Valiukevičius J., Karatajūtė-Talimaa V. *Kompleks cheshuj akantodov iz osnovaniya srednego Devona Pribaltiki i Belorussii* [An assemblage of the acanthodian scales from the bottom of the Middle Devonian Baltic States and Byelorussia]. Biofacies and fauna of the Silurian and Devonian basins of the Baltic States. Riga, Zinātne Publ., 1986, pp. 110–122. (in Russian)
4. Plax D. P., Newman M. J. New Early Devonian (Late Emsian) placoderms from Belarus. *Journal of Paleontology*, 2020, vol. 94 (4), pp. 773–787.
5. Gross W. Kleinschuppen, Flossenstacheln und Zähne von Fischen aus europäischen und nordamerikanischen Bonebeds des Devons. *Palaeontographica Abt. A*, 1973, vol. 142, s. 51–155. (in German)
6. Preobrazhensky I. A. O nekotorykh predstaviteleyakh semejstva Psammosteidae Ag. [On some members of the family Psammosteidae Ag.]. *Protokol Obshchestva Estestvoispytatelej Yur'evskogo Instituta*, 1911, vol. 19, pp. 21–36.
7. Gross W. Acanthodier und Placodermen aus den *Heterostius*-Schichten Estlands und Lettlands. *Annales Societatis Rebus Naturae Investigandis in Universitate Tartuensi Constitutae*, 1940, vol. 46, s. 12–98. (in German)
8. Valiukevičius J. *Akantody narovskogo gorizonta Glavnogo devonskogo polya* [Acanthodians from the Narva Regional Stage of the Main Devonian Field]. Vilnius, Moksas Publ., 1985, 144 p. (in Russian)
9. Traquair R. H. On a new species of *Diplacanthus*, with remarks on the acanthodian shoulder-girdle. *Geological Magazine (Decade 4)*, 1894, vol. 1, pp. 254–257.
10. Agassiz L. R. Monographie des poissons du Vieux Grès Rouge ou Système Dévonien (Old Red Sandstone) des îles Britanniques et de Russie. Neuchâtel, Jent and Gassmann Publ., 1844.
11. Egerton P. de M. G. British fossils. (Descriptions of *Tristichopterus*, *Acanthodes*, *Climatius*, *Diplacanthus*, *Cheiracanthus*). *Memoirs of the Geological Survey of the United Kingdom (British Organic Remains)*, 1861, vol. 10, pp. 51–75.
12. Valiukevičius J. Acanthodians and zonal stratigraphy of Lower and Middle Devonian in East Baltic and Byelorussia. *Palaeontographica Abt. A*, 1998, vol. 248, s. 1–53.
13. Valiukevičius J. Acanthodian zonal sequence of Early and Middle Devonian in the Baltic basin. *Geologija*, 1994, vol. 17, pp. 115–125.
14. Plaksa D. P. *Devonskaya (pozdneemssko-franskaya) ikhtiofauna Belarusi i ee stratigraficheskoe znachenie* [Devonian (Late-Emsian – Frasnian) fish fauna of Belarus and its stratigraphic importance]. Abstract of the Ph. D. thesis. Minsk, 2007, 23 p. (in Russian with Belarusian and English summary).
15. Plaksa D. P. *Vvedenie zonal'nykh shkal po pozvonochnym v stratigraficheskuyu shkalu devonских отложений Belarusi* [Introduction of vertebrate zonal scales into the Stratigraphic Chart of Devonian deposits of Belarus]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2008, vol. 52, no 4, pp. 83–88. (in Russian)
16. Plax D. P. O devonskoj ikhtiofaune Belarusi [Devonian fish fauna of Belarus]. *Lithosphere*, 2008, no. 2 (29), pp. 66–92. (in Russian)
17. Mark-Kurik E. The Middle Devonian fishes of the Baltic States (Estonia, Latvia) and Belarus. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg (Final Report of IGCP 328 project)*, 2000, vol. 223, pp. 309–324.
18. Lyarskaya L. A. *Rezeknenskaya svita i ee vozrastnye analogi* [The Rēzekne Formation and its age equivalents]. The Stratigraphy of the Phanerozoic of the Baltic States. Riga, Zinātne Publ., 1978, pp. 22–39. (in Russian)
19. Sorokin V. S. [et al.]. *Devon i karbon Pribaltiki* [The Devonian and Carboniferous of the Baltic States]. Riga, Zinātne Publ., 1981, 502 p. (in Russian)
20. Valiukevičius J., Kruchek S. Acanthodian biostratigraphy and interregional correlations of the Devonian of the Baltic States, Belarus, Ukraine and Russia. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg (Final Report of IGCP 328 project)*, 2000, vol. 223, pp. 271–289.
21. Rodionova G. D. [et al.]. *Devon Voronezhskoj anteklizy i Moskovskoj sineklizy* [The Devonian of the Voronezh Anticline and the Moscow Syncline]. Moscow, 1995, 265 p. (in Russian)

22. Vorotnikova G. V. [et al.]. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossii skoj Federatsii* [State geological map of the Russian Federation]. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Central European Series. Sheet N-36 (M-36) : explanatory note. St.-Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2011, 267 p. (in Russian)
23. Glinskiy V. N., Pinakhina D. V. New data on psammoseid heterostracans (Pteraspidomorpha) and acanthodians (Acanthodii) from the Pärnu Regional Stage (Lower Eifelian, Middle Devonian) of Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2018, vol. 67 (1), pp. 76–87.
24. Valiukevičius J., Golubtsov V. K. *Devonskaya sistema* [The Devonian system]. Geological map of the USSR. Scale of 1 : 1,000,000 (new series). Sheet N-(34), (35) : explanatory note. Vilnius ; Leningrad, 1986, pp. 53–68. (in Russian)
25. Valiukevičius J., Talimaa V., Kruchek S. Complexes of vertebrate microremains and correlation of terrigenous Devonian deposits of Belarus and adjacent territories. Ichthyolith Issues. Special Publication no 1. New Mexico, Socorro Publ., 1995, pp. 53–59.
26. Plax D. P. Devonian ichthyofauna of the Volyn Monocline. *Lithosphere*, 2011, no. 2 (35), pp. 12–21.
27. Valiukevičius J. New Silurian to Middle Devonian acanthodians of the Timan-Pechora region. *Acta Geologica Polonica*, 2003, vol. 53, no. 3, pp. 209–245.
28. Ivanov A., Lebedev O. Devonian vertebrate localities in the Luga River basin (Leningrad Region, Russia). Guidebook for the field trip. St.-Petersburg, 2011, pp. 1–37.

Список использованных источников

1. Геология Беларуси / Национальная академия наук Беларуси, Институт геологических наук ; А. С. Махнач [и др.] ; под ред. А. С. Махнача [и др.]. – Минск, 2001. – 815 с.
2. Девонская система / Т. Г. Обуховская [и др.] // Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси: объяснительная записка. – Минск : БелНИГРИ, 2010. – С. 98–114 (со стратиграфическими схемами девонских отложений Беларуси на 2 л.).
3. Валюкявичюс, Ю. Комплекс чешуй акантодов из основания среднего девона Прибалтики и Белоруссии / Ю. Валюкявичюс, В. Карапаюте-Талимаа // Биофации и фауна силурийского и девонского бассейнов Прибалтики. – Рига : Зинатне, 1986. – С. 110–122.
4. Plax, D. P. New Early Devonian (Late Emsian) placoderms from Belarus / D. P. Plax, M. J. Newman // *Journal of Paleontology*. – 2020. – Vol. 94 (4). – P. 773–787.
5. Gross, W. Kleinschuppen, Flossenstacheln und Zähne von Fischen aus europäischen und nordamerikanischen Bonebeds des Devons / W. Gross // *Palaeontographica Abt. A*. – 1973. – Vol. 142. – S. 51–155.
6. Преображенский, И. А. О некоторых представителях семейства Psammosteidae Ag. / И. А. Преображенский // Протокол общества естествоиспытателей Юрьевского института. – 1911. – Вып. 19. – С. 21–36.
7. Gross, W. Acanthodier und Placodermen aus den *Heterostius*-Schichten Estlands und Lettlands / W. Gross // *Annales Societatis Rebus Naturae Investigandis in Universitate Tartuensi Constitutae*. – 1940. – Vol. 46. – S. 12–98.
8. Валюкявичюс, Ю. Акантоды наровского горизонта Главного девонского поля / Ю. Валюкявичюс. – Вильнюс, 1985. – 144 с.
9. Traquair, R. H. On a new species of *Diplacanthus*, with remarks on the acanthodian shoulder-girdle / R. H. Traquair // *Geological Magazine (Decade 4)*. – 1894. – Vol. 1. – P. 254–257.
10. Agassiz, L. R. Monographie des poissons du Vieux Grès Rouge ou Système Dévonien (Old Red Sandstone) des Isles Britanniques et de Russie / L. R. Agassiz. – Neuchâtel : Jent and Gassmann, 1844.
11. Egerton, P. de M. G. British fossils. (Descriptions of *Tristichopterus*, *Acanthodes*, *Climatius*, *Diplacanthus*, *Chei-racanthus*) / P. de M. G. Egerton // *Memoirs of the Geological Survey of the United Kingdom (British Organic Remains)*. – 1861. – Vol. 10. – P. 51–75.
12. Valiukevičius, J. Acanthodians and zonal stratigraphy of Lower and Middle Devonian in East Baltic and Byelorussia / J. Valiukevičius // *Palaeontographica Abt. A*. – 1998. – Vol. 248. – S. 1–53.
13. Valiukevičius, J. Acanthodian zonal sequence of Early and Middle Devonian in the Baltic basin / J. Valiukevičius // *Geologija*. – 1994. – Vol. 17. – P. 115–125.
14. Плакса, Д. П. Девонская (позднеэмиско-франнская) ихтиофауна Беларуси и ее стратиграфическое значение : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Д. П. Плакса ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т геохимии и геофизики. – Минск, 2007. – 23 с. (на русском языке с белорусским и английским резюме).
15. Плакса, Д. П. Введение зональных шкал по позвоночным в стратиграфическую схему девонских отложений Беларуси / Д. П. Плакса // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2008. – Т. 52, № 4. – С. 83–88.
16. Плакс, Д. П. О девонской ихтиофауне Беларуси / Д. П. Плакс // *Літасфера*. – 2008. – № 2 (29). – С. 66–92.
17. Mark-Kurik, E. The Middle Devonian fishes of the Baltic States (Estonia, Latvia) and Belarus / E. Mark-Kurik // *Courier Forschungsinstitut Senckenberg (Final Report of IGCP 328 project)*. – 2000. – Vol. 223. – P. 309–324.
18. Лярская, Л. А. Резекненская свита и ее возрастные аналоги / Л. А. Лярская // Стратиграфия фанерозоя Прибалтики. – Рига : Зинатне, 1978. – С. 22–39.
19. Девон и карбон Прибалтики / В. С. Сорокин [и др.]. – Рига : Зинатне, 1981. – 502 с.
20. Valiukevičius, J. Acanthodian biostratigraphy and interregional correlations of the Devonian of the Baltic States, Belarus, Ukraine and Russia / J. Valiukevičius, S. Kruchek // *Courier Forschungsinstitut Senckenberg (Final Report of IGCP 328 project)*. – 2000. – Vol. 223. – P. 271–289.
21. Девон Воронежской антеклизы и Московской синеклизы // Г. Д. Родионова [и др.]. – М., 1995. – 265 с.

22. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Центрально-европейская серия. Лист N-36 (М-36): пояснительная записка / Г. В. Воротникова [и др.]. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 267 с.
23. Glinskiy, V. N. New data on psammoseid heterostracans (Pteraspidomorpha) and acanthodians (Acanthodii) from the Pärnu Regional Stage (Lower Eifelian, Middle Devonian) of Estonia / V. N. Glinskiy, D. V. Pinakhina // Estonian Journal of Earth Sciences. – 2018. – Vol. 67 (1). – P. 76–87.
24. Валюкевичюс, Ю. Девонская система // Геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая серия). Лист N-(34), (35): пояснительная записка / Ю. Валюкевичюс, В. К. Голубцов. – Вильнюс ; Л., 1986. – С. 53–68.
25. Valiukevičius, J. Complexes of vertebrate microremains and correlation of terrigenous Devonian deposits of Belarus and adjacent territories / J. Valiukevičius, V. Talimaa, S. Kruchek // Ichthyolith Issues. Special Publication № 1. – New Mexico : Socorro, 1995. – P. 53–59.
26. Plax, D. P. Devonian ichthyofauna of the Volyn Monocline / D. P. Plax // Lithosphere. – 2011. – № 2 (35). – P. 12–21.
27. Valiukevičius, J. New Silurian to Middle Devonian acanthodians of the Timan-Pechora region / J. Valiukevičius // Acta Geologica Polonica. – 2003. – Vol. 53, № 3. – P. 209–245.
28. Ivanov, A. Devonian vertebrate localities in the Luga River basin (Leningrad Region, Russia) / A. Ivanov, O. Lebedev // Guidebook for the field trip. – St. Petersburg, 2011. – P. 1–37.

Information about the author

Dmitry P. Plax – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of Mining, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Av., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: agnatha@mail.ru

Maksim A. Bahdasarau – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus; Professor of the Department of Geography and Nature Management, Brest State A. S. Pushkin University (Cosmonauts Boulevard, 21, 224016, Brest, Belarus); Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Brest State Technical University (Moskovskaya St., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: bogdasarov73@mail.ru

Информация об авторах

Плакс Дмитрий Петрович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры «Горные работы» Белорусского национального технического университета (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь). E-mail: agnatha@mail.ru

Богдасаров Максим Альбертович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор кафедры географии и природопользования, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (б-р Космонавтов, 21, 224016, Брест, Беларусь); профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета (ул. Московская, 267, 224017, Брест, Беларусь). E-mail: bogdasarov73@mail.ru

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-173-180>

УДК 662.67

Поступила в редакцию 30.03.2023

Received 30.03.2023

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА**

Г. П. Бровка, И. И. Лиштван, А. А. Мурашко,
И. В. Дедюля, А. Г. Бровка, К. А. Агутин

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Разработанная установка относится к области термохимической переработки твердых горючих ископаемых и других горючих материалов методом пиролиза с целью получения высококалорийных твердых и жидкого горючего, газов и может быть использована для термохимической переработки бурых углей, горючих сланцев, отходов полимеров и нефтепродуктов. Предварительные испытания и расчеты показали, что разработанная опытная установка позволяет реализовать принципиально новую технологическую схему термической переработки горючих сланцев без дополнительного теплоносителя с разделением в процессе переработки жидкого, газообразного и твердых компонентов. Разработанной установке не требуются традиционные циклон и конденсатор. Важным преимуществом разработанной установки является повторное использование (сжигание) летучих компонентов пиролиза в цикле разогрева перерабатываемого материала, что существенно снижает воздействие на окружающую среду выбросов продуктов термической переработки.

Ключевые слова: пиролиз; горючие сланцы; опытная установка; термическая переработка.

Для цитирования. Бровка Г. П., Лиштван И. И., Мурашко А. А., Дедюля И. В., Бровка А. Г., Агутин К. А. Повышение эффективности термохимической переработки горючих материалов методом пиролиза // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 173–180.

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THERMOCHEMICAL PROCESSING
OF COMBUSTIBLE MATERIALS BY PYROLYSIS METHOD**

G. P. Brovka, I. I. Lishtvan, A. A. Murashko,
I. V. Dedyulya, A. G. Brovka, K. A. Agutin

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

Abstract. The development belongs to the field of thermochemical processing of solid fuels and other combustible materials by pyrolysis to produce high-caloric solid and liquid products, combustible gases, and can be used for thermochemical processing of brown coals, oil shale, polymer waste and petroleum products. Preliminary tests and calculations have shown that the developed pilot unit allows to realize a fundamentally new technological scheme of thermal processing of oil shale without additional heat carrier with separation of liquid, gaseous and solid components in the process of processing. The developed unit does not require traditional cyclone and condenser. An important advantage of the developed unit is the reuse (combustion) of volatile components of the pyrolysis process in the recycled material heating cycle, which significantly reduces the environmental impact of the thermal processing products emissions.

Keywords: pyrolysis; oil shale; pilot plant; thermal processing.

For citation. Brovka G. P., Lishvan I. I., Murashko A. A., Dedyulya I. V., Brovka A. G., Agutin K. A. Improving the efficiency of thermochemical processing of combustible materials by pyrolysis method. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 173–180.

Введение. Непрерывный рост мирового энергопотребления сопровождается истощением основных энергетических ресурсов, особенно нефти. Запасы же горючих сланцев огромны и составляют около $6,5 \cdot 10^{13}$ т. Есть сведения, что ресурсы органического углерода, аккумулированного в сланцах, превышают запасы всех других видов топлив, вместе взятых. Актуальным становится вопрос о переработке горючих сланцев в жидкое топливо и другие химические продукты. В пересчете на эквивалентную нефть (условное топливо), выделяемую в стандартной реторте, запасы сланцев составляют 630 млрд т, что значительно превышает мировые ресурсы жидких углеводородов – 280 млрд т.

Следует отметить, что низкое содержание керогена в горючих сланцах месторождений Беларуси, в сравнении с эстонскими сланцами, не позволяет использовать известные технологии их термопереработки. Поэтому необходим поиск более эффективных и рентабельных способов переработки горючих сланцев Беларуси.

С одной стороны, сдерживающим фактором широкого использования горючих сланцев в Республике Беларусь в качестве энергоносителей сегодня является отсутствие технологий, позволяющих экономически эффективно получать востребованные энергоносители. К таким технологиям помимо их высокой эффективности и прибыльности предъявляются требования минимизации отрицательных воздействий на окружающую среду. С другой стороны, с целью повышения энергетической безопасности, наряду с альтернативными источниками энергии, закономерно возрастает роль имеющихся в республике твердых горючих ископаемых, включая в первую очередь значительные ресурсы горючих сланцев. В сложившейся ситуации возрастает актуальность детальных исследований в направлении повышения эффективности технологии переработки белорусских горючих сланцев.

Лабораторные испытания. Анализ литературных источников [1–3], ранее выполненных лабораторных исследований и расчетов показал необходимость поиска более эффективных решений по конструкции установки для термохимической переработки горючих сланцев. При термохимической переработке твердых горючих ископаемых в подвижном слое важно, чтобы скорость подачи материала соответствовала интенсивности его теплообмена. Это трудно реализовать с помощью стандартных шнеков, в которых при увеличении оборотов вместе с интенсивностью теплообмена увеличивается и скорость подачи материала. Поэтому в устройствах по термохимической переработке, созданных на базе стандартных шнеков, трудно обеспечить необходимую температуру и производительность термохимической переработки. Это можно сделать на базе специальных шнеков-смесителей. При этом шнеки-смесители должны в первую очередь интенсивно перемешивать материал, обеспечивать хорошую парогазовую проницаемость в зоне термохимической переработки и подавать материал со скоростью, позволяющей прогревать его до необходимой температуры.

Для определения параметров конструкции шнека-смесителя установки по термической переработке горючих сланцев в подвижном слое использован лабораторный стенд, разработанный в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси [4], конструкция которого представлена на рис. 1.

Стенд состоит из цилиндрического кожуха 1 с загрузочным и разгрузочным окнами. Внутри кожуха на опорах скольжения могут устанавливаться различные рабочие органы 2, осуществляющие необходимую интенсивность перемешивания термически разлагаемого топлива и подачу твердого остатка к разгрузочному окну с требуемой скоростью. Привод рабочего органа осуществляется с помощью червячного мотор-редуктора 3 и цепной передачи, что позволяет с применением частотного модулятора осуществлять вращение вала со скоростью от нескольких до десятков оборотов в минуту. Питание привода осуществляется с помощью переносного кабеля пультом 4. Напряжение питания электродвигателя – 380 В. Вся установка смонтирована на станине 5. Для сборки материала, имитирующего топливо, на металлоконструкции установлен мерный сборник 6.

На начальном этапе были испытаны три вида шнеков-смесителей, которые отличались конструктивно, имея одно и то же функциональное назначение. Проведенные лабораторные испытания показали [4], что, используя такие шнеки-смесители, можно в 2–3 раза увеличить производительность оборудования по термохимической переработке твердых горючих ископаемых по сравнению со стандартными шнеками. В дальнейшем был разработан и испытан четвертый вариант шнека-смесителя ленточного типа с двухходовой спиралью (рис. 2).

Анализ выполненных испытаний показал, что для термической переработки горючих сланцев на установке проточного типа последний вариант шнека-смесителя выглядит предпочтительнее. При этом

желоб шнека должен быть открыт для обеспечения интенсивного удаления продуктов термодеструкции сланца. Кроме того, открытый желоб позволяет осуществлять дополнительный разогрев перерабатываемого материала с помощью лучистого излучателя. С учетом указанного требования были испытаны варианты шнека-смесителя ленточного типа с двухходовой спиралью при различном соотношении шага спирали и диаметра открытого желоба.

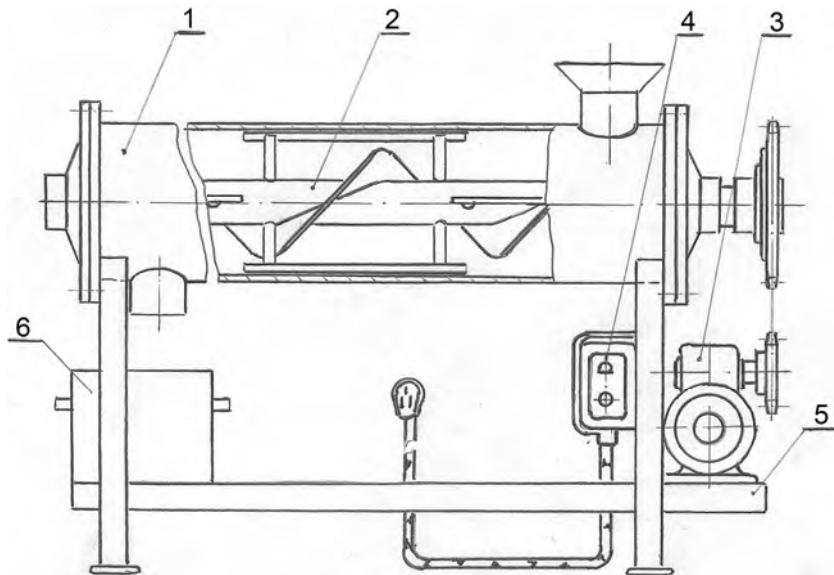


Рис. 1. Лабораторный стенд для отработки способов интенсификации тепло- и массообмена при термохимической переработке твердых горючих ископаемых в подвижном слое.
Обозначения приведены в тексте статьи

Fig. 1. Laboratory bench for testing methods of heat and mass transfer intensification during thermochemical processing of solid fossil fuels in a movable layer.
The designations are given in the text of the article



Рис. 2. Шнек-смеситель для сыпучих материалов в виде двойной спирали

Fig. 2. Screw mixer for bulk materials in the form of a double helix

Проведенные испытания показали, что для обеспечения оптимальных параметров прогрева горючего сланца за время прохождения материала через шнек-смеситель необходимо, чтобы шаг шнека удовлетворял отношению к диаметру желоба шнека в пределах 1,7–2,0. Полученное соотношение было учтено при разработке опытной установки по термической переработке горючих сланцев.

Лабораторные испытания шнеков-смесителей в открытом желобе позволили обосновать выбор элементов конструкции опытной установки для термической переработки горючих сланцев с разделением выходов сланцевой смолы, летучих компонентов и полуокиса.

Опытная установка. На рис. 3 и 4 показаны поперечный разрез в центральной части и продольный разрез установки для термической переработки горючих материалов методом пиролиза. Основной элемент установки – шнек-смеситель 1 с желобом открытого типа 2, являющимся одновременно стенками камеры высокотемпературного разогрева горячими газами 3. Вся конструкция шнека-смесителя с обогреваемым желобом помещена в герметичную цилиндрическую камеру 4, которая в нижней части охлаждается проточной водой и является камерой конденсации с желобом 5 продуктов термической переработки. Внешние стенки обогреваемого желоба изолированы термостойкой теплоизоляцией 6.

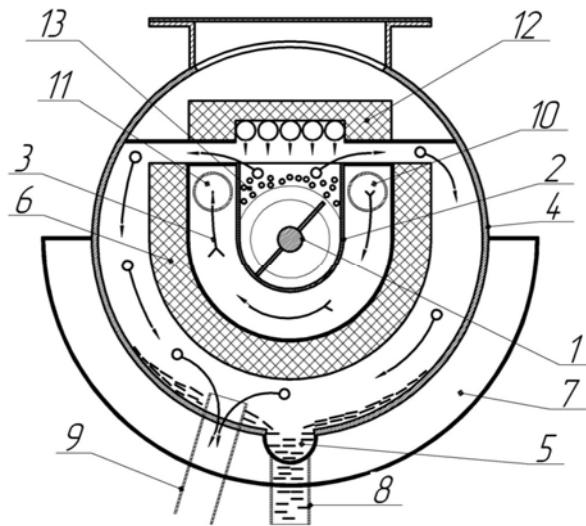


Рис. 3. Поперечный разрез в центральной части опытной установки по термической переработке горючих сланцев. Обозначения приведены в тексте статьи

Fig. 3. Cross-section in the central part of the pilot plant for thermal processing of oil shale.
The designations are given in the text of the article

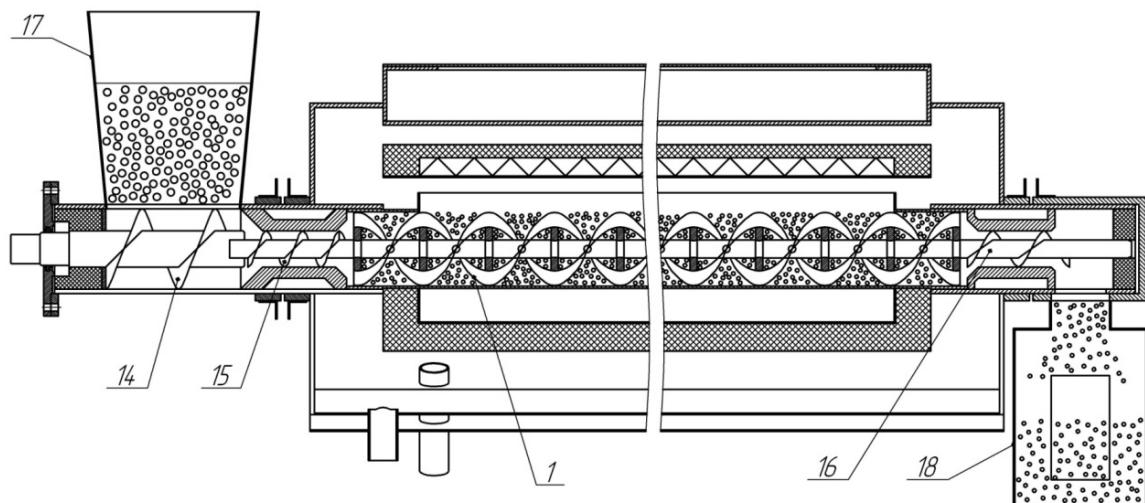


Рис. 4. Продольный разрез опытной установки по термической переработке горючих сланцев.
Обозначения приведены в тексте статьи

Fig. 4. Longitudinal section of the pilot plant for thermal processing of oil shale.
The designations are given in the text of the article

Для разогрева рабочей зоны установки в торцевые стенки камеры высокотемпературного разогрева 3 введены патрубки из жаростойкой стали 10 и 11. Со стороны выгрузного бункера 18 патрубок соединен с камерой сжигания, в которую вставлена газовая горелка мощностью 10 кВт. Со стороны загрузочного бункера 17 патрубок сообщается с дымовой трубой, на которой установлен дымосос. Вывод газообразных продуктов деструкции сланца осуществляется через Т-образный патрубок 9, герметично вмонтированный в нижнюю часть камеры конденсации со стороны загрузочного бункера. Свободный отвод патрубка 10 через вентиль сообщается с камерой горения, а свободный отвод патрубка 11 через такой же вентиль соединен с дымовой трубой.

Нижняя половина камеры конденсации снабжена водяной рубашкой 7 и может охлаждаться проточной водой. Вдоль нижней части камеры конденсации вварен желоб 5 для сбора сланцевой смолы и воды, сконденсированных на ее внутренних стенках 4. Продукты конденсации могут отводиться из желоба 5 с помощью патрубка 8, который заканчивается вентилем 22 (рис. 5), расположенным вблизи торцевой части камеры конденсации со стороны загрузочного бункера. Для дополнительного разогрева перерабатываемого материала над открытой частью желоба может располагаться лучистый нагреватель в виде спирали из никромовой проволоки, уложенной в кварцевые трубы 12. Использование дополнительного лучистого обогрева позволяет в 2 раза повысить производительность установки по термической переработке горючих сланцев.

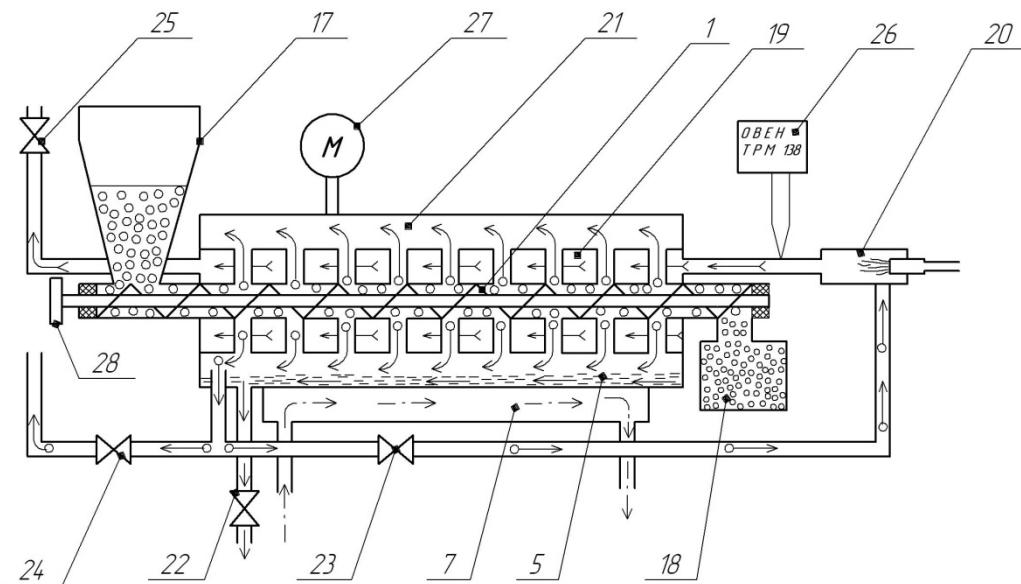


Рис. 5. Схема опытной установки для термической переработки горючих сланцев.
Обозначения приведены в тексте статьи

Fig. 5. Schematic diagram of a pilot plant for thermal processing of oil shale.
The designations are given in the text of the article

Шнековый транспортер установки состоит из четырех частей, отличающихся диаметром и шагом. В загрузочной части 14 диаметр вала шнека составляет 50 мм, диаметр винта шнека – 110 мм и имеет шаг 100 мм. Далее идет дозировочно-уплотняющая часть шнека 15 с диаметром вала 25 мм, диаметром винта 50 мм и шагом 50 мм. В этой части расположена специальная вставка, которая уменьшает диаметр желоба до 50 мм. Конструкция дозировочно-уплотняющей части позволяет жестко привязать интенсивность загрузки перерабатываемого материала к скорости вращения вала шнека и исключает возможность прорыва газов из рабочей камеры установки. За дозировочно-уплотняющей частью располагается рабочая область камеры со шнеком-смесителем 1 в виде двухходовой спирали диаметром 102 мм и шагом 180 мм. Желоб этой части открыт и заключен в камеру высокотемпературного разогрева. Рабочая область шнека заканчивается выгрузочно-уплотняющей частью 16, аналогичной дозировочно-уплотняющей. В торцевых частях камеры конденсации расположены загрузочный 17 и выгрузной 18 бункера.

Термическая переработка горючих сланцев на разработанной установке осуществляется по схеме, в которой можно выделить пять отдельных контуров, взаимодействующих друг с другом посредством тепло- и массообмена. Взаимодействие контуров проиллюстрировано принципиальной техноло-

гической схемой, представленной на рис. 5. Основным является контур, обеспечивающий подачу, перемещение и выгрузку переработанного материала. Для этого используется шнековый транспортер, основным элементом которого является шнек-смеситель 1 с желобом открытого типа в рабочем пространстве. В этот контур входят загрузочный 17 и выгрузкой 18 бункера. Нагрев переработанного материала осуществляется путем аблационного теплообмена шнекового транспортера с контуром обогрева 19, по которому во встречном направлении пропускается нагретый дымовой газ от сжигания топливного газа 20 и летучих компонентов термодеструкции переработанного сланца 21. Конденсация летучих компонентов, выделившихся из нагретого до необходимой температуры сланца, осуществляется в контуре конденсации на стенках цилиндрической поверхности, охлаждаемой технической водой до температуры 50–90 °С в контуре охлаждения 7. Продукты конденсации накапливаются в желобе 5, расположеннем в нижней части цилиндрической камеры конденсации и периодически удаляются через вентиль 22.

Управление режимом разогрева осуществляется с помощью вентилей 23, 24 и вентиля 25 на выходе дымовых газов горелки 20. Контроль температурного режима осуществляется с помощью восьми алюмель-хромелевых термопар, расположенных в различных частях установки, и восьмиканального регистратора температуры ОВЕН ТРМ138 26. Давление газов в камере конденсации контролируется с помощью мановакумметра 27. Привод 28 шнекового транспортера реализован с помощью мотора-редуктора типа STM UM-1, управляемого частотным регулятором. Оптимизация режима сжигания газообразных продуктов пиролиза и удаления дымовых газов может осуществляться дымососом, также управляемым с помощью частотного регулятора.

Для оптимизации степени заполнения шнекового пиролизера и расхода перерабатываемого материала, а также сбора продуктов конденсации шнековый пиролизер может устанавливаться с наклоном к горизонтальной поверхности. Причем оптимальный тангенс угла наклона оси шнекового пиролизера в направлении подъема в сторону выгрузочного бункера может изменяться в пределах от 0,03 до 0,15. Такой наклон способствует более полному заполнению шнекового транспортера перерабатываемым материалом и интенсификации стока в сторону выгрузки продуктов конденсации.



Рис. 6. Опытная установка для термической переработки горючих сланцев с открытой верхней крышкой

Fig. 6. Pilot plant for thermal processing of oil shale with an open top lid

Процесс термической переработки горючих сланцев. На данной установке отработан процесс термической переработки горючих сланцев, который осуществляется следующим образом. Измельченный до фракций не более 5 мм сланец засыпается в загрузочный бункер. В камеру высокотемпературного разогрева подаются горячие дымовые газы от газовой горелки. С помощью горячих газов температура на выгрузочном конце камеры высокотемпературного разогрева доводится до 200–250 °C.

После этого включается подача перерабатываемого сланца в рабочую камеру с помощью шнека при скорости его вращения 8 об/мин. При подключении дополнительного радиационного нагревателя мощностью до 10 кВт необходимо скорость вращения вала шнека повысить до 15 об/мин. Это обеспечивает увеличение производительности установки по термической переработке горючих сланцев до 2 раз. В начальный период ведется непрерывный контроль температурного режима с помощью многоканального регистратора температуры типа «Овен» и давления в цилиндрической камере с помощью манометра. По истечении 10–15 мин после начала подачи сланца в рабочую камеру установка должна выйти на рабочий режим. При этом температура камеры разогрева должна изменяться от 200 °C на загрузочном конце до 600 °C на выгрузочном конце. Давление газов в цилиндрической камере должно составлять 0,05–0,1 атм. После выхода установки на рабочий режим можно провести переключение выхода летучих компонентов термодеструкции сланца в камеру сжигания, частично заменив расход топливного газа. Для этого открывается вентиль на патрубке, сообщающем камеру конденсации с камерой сжигания и частично перекрывается вентиль на выходе газов термодеструкции в дымовую трубу. При осуществлении данной операции ведется наблюдение за изменением температурного режима в камере высокотемпературного разогрева. Оптимальные положения вентилей, регулирующих расход газов, не должны нарушать установленный температурный режим установки.

Через 30 мин после начала подачи сланца в рабочую камеру производится периодическое открывание вентиля на патрубке выхода продуктов конденсации (пиролизной воды и сланцевой смолы).

В установленном режиме процесс термической переработки сланца продолжается до опорожнения загрузочного бака. При этом остатки сланца должны находиться в начальной части шнека для предотвращения прорыва газов из рабочей камеры.

Для остановки процесса термической переработки сланца необходимо перекрыть вентиль выхода летучих компонентов в камеру сжигания и открыть полностью вентиль выхода летучих компонентов в дымовую трубу. Газовую горелку полностью выключить. Вращение шнека остановить. Продолжать охлаждать камеру разогрева методом периодической смены воды в охлаждающей рубашке. После охлаждения камеры разогрева до температуры ниже 100 °C и температуры в бункере выгрузки ниже 150 °C включить шnekовый транспортер и полностью выгрузить остатки сланца в выгрузной бункер.

Количество летучих компонентов переработанного сланца оценивается методом взвешивания по разности количества загруженного сланца и суммарного количества выхода продуктов конденсации и полуокиси сланца.

Заключение. Предварительные испытания и расчеты показали, что разработанная опытная установка позволяет реализовать принципиально новую технологическую схему термической переработки горючих сланцев без дополнительного теплоносителя с разделением в процессе переработки жидких, газообразных и твердых компонентов. Разработанной нами установке не требуются традиционные циклон и конденсатор. Важным преимуществом разработанной установки является повторное использование (сжигание) летучих компонентов пиролиза в цикле разогрева перерабатываемого материала, что существенно снижает воздействие на окружающую среду выбросов продуктов термической переработки.

Техническую новизну данной разработки предполагается защитить патентом на изобретение. В настоящее время проходит экспертиза заявки на изобретение а 20210367 от 28 декабря 2021 г.

Представленная установка может быть использована для термической переработки методом пиролиза твердых, пастообразных и полужидких материалов, таких как нефтешламы, загрязненные отходы полимеров, отработанные смазочные и смазочно-охлаждаемые материалы.

Список использованных источников

1. Установка для пиролиза древесины : пат. RU 2346023 С1 / А. Н. Грачев. – Опубл. 10.02.2009.
2. Экспериментальная установка по термохимической переработке бурых углей и результаты ее испытаний / П. Л. Фалюшин [и др.] // Природопользование. – 2009. – Вып. 15. – С. 211–216.
3. Деструктивная перегонка твердого сырья специальных видов или особой формы и размеров : пат. BY 16915 С1 / И. И. Лиштван. – Опубл. 28.02.2013.
4. Способы интенсификации тепло- и массообмена при термохимической переработке твердых горючих иско-
паемых / Г. П. Бровка [и др.] // Природопользование. – 2015. – Вып. 28. – С. 84–89.

References

1. Grachev A. N. *Ustanovka dlya piroliza drevesiny* [Device for pyrolysis of wood]. Patent RF no. 2346023 C1, 2007. (in Russian)
2. Falyushin P. L. Dudarchik V. M., Tanovitsky V. I., Kozhurin V. N. *Eksperimental'naya ustanovka po termohimicheskoy pererabotke burykh uglej i rezul'taty ee ispytanij* [Experimental installation for thermochemical processing of brown coals and the results of its tests]. *Nature Management*, 2009, iss. 15, pp. 211–216. (in Russian)
3. Lishtvan I. I. *Destruktivnaya perekonna tverdogo syr'ya special'nyh vidov ili osoboj formy i razmerov* [Destructive distillation of solid raw materials of special kinds or special forms and sizes]. Patent BY no. 16915 C1, 2013. (in Russian)
4. Brovka G. P., Romanenko I. I., Dedyulya I. V., Andreenko N. V. *Sposoby intensifikacii teplo- i massoobmena pri termohimicheskoy pererabotke tverdyh goryuchih iskopaemyh* [Methods of intensification of heat and mass transfer during thermochemical processing of solid fossil fuel]. *Nature Management*, 2015, iss. 28, pp. 84–89. (in Russian)

Информация об авторах

Бровка Геннадий Петрович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka_gp@tut.by

Лиштван Иван Иванович – академик, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Мурашко Андрей Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: amurbmw@tut.by

Дедюля Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dedyulyaivan@yandex.ru

Бровка Андрей Геннадьевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: andrew_brovka@rambler.ru

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

Information about the authors

Gennady P. Brovka – D. Sc. (Technical), Associate Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by

Ivan I. Lishtvan – Academician, D. Sc. (Technical), 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

Andrey A. Murashko – Ph. D. (Geology and Mineralogy), 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: amurbmw@tut.by

Ivan V. Dedyulya – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dedyulyaivan@yandex.ru

Andrey G. Brovka – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: andrew_brovka@rambler.ru

Kirill A. Agutin – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

УТИЛИЗАЦИЯ ПОЛИМЕРСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ИХ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПИРОЛИЗА С ТОРФОМ

И. И. Лиштван, В. М. Дударчик, В. М. Крайко, Е. В. Ануфриева

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Статья посвящена проблеме утилизации полимерсодержащих отходов методом их катализитического пиролиза с торфом, в результате чего целевыми продуктами становятся полученные новые более качественные виды химического сырья или топлива с максимально большой теплотой сгорания. Одним из важных факторов, определяющих глубину конверсии данного процесса, является использование катализаторов разложения углеводородного сырья – солей металлов подгруппы железа.

Установлено, что при пиролизе торфополимерных композиций в присутствии катализаторов (соли кобальта, марганца, железа) в стационарном слое обнаружено значительное увеличение глубины конверсии органического вещества, выражющееся в снижении баланса содержания коксозольного остатка до 25 % органического материала.

В результате катализитического пиролиза торфополимерных композиций наиболее энергоемкими являются продукты, содержащиеся в газообразной и жидкой фракциях. Добавка полимера в присутствии катализатора приводит к увеличению их теплотворной способности. Так, при термохимической деструкции торфополимерных систем в образцах, содержащих до 20 мас.% отходов полимеров увеличение калорийности пиролизного газа повышается в 1,5–2,0 раза.

Ключевые слова: торф; полимерсодержащие отходы; катализаторы; пиролиз; термодеструкция; смесевые композиции; смола; пиролизный газ; теплота сгорания.

Для цитирования. Лиштван И. И., Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В. Утилизация полимерсодержащих отходов методом их катализитического пиролиза с торфом // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 181–186.

THE UTILIZATION OF POLYMER CONTAINING WASTES BY THE METHOD OF THEIR CATALYTIC PYROLYSIS WITH PEAT

I. I. Lishtvan, V. M. Dudarchyk, V. M. Kraiko, A. V. Anufrieva

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

Abstract. The article is dedicated to the problem of polymer containing waste utilization by the method of their catalytic pyrolysis with peat as the result of which new types of chemical raw or fuel of more higher quality with maximum high burning warmth are obtained. One of the main factors determines the conversion depth of the given process is the use of the catalysts of hydrocarbon raw decomposition, which are the salts of iron subgroups metals.

It is established that significant increase in the depth of organic substance conversion expressed in decrease in the balance of cock-ash residue content up to 25 % of organic material has been found in stationary layer during the pyrolysis of peat polymeric compositions during catalysts presence (cobalt, manganese, iron salts).

Products contained in gaseous and liquid fractions are more energy intensive in the result of the catalytic pyrolysis of peat polymeric compositions. Polymer addition during catalyst presence leads to an increase in their heating value. Then an increase in pyrolysis gas calorific value rises in 1.5-2 times during the thermo chemical destruction of peat polymeric systems in samples containing up to 20 % by the mass of polymeric waste.

Keywords: peat; polymer containing waste; catalysts; pyrolysis; thermo destruction; mixed compositions; tar; pyrolysis gas; burning warmth.

For citation. Lishtvan I. I., Dudarchyk V. M., Kraiko V. M., Anufrieva A. V. The utilization of polymer containing wastes by the method of their catalytic pyrolysis with peat. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 181–186.

Введение. В настоящее время объемы производства пластмассовых изделий достигли огромных размеров – всего в мире их выпускается свыше 220 млн т ежегодно. Утилизация отходов пластмасс стала общемировой проблемой. Пластиковые отходы не просто засоряют окружающую среду, но и загрязняют ее. Пластик разлагается сотни лет, внося в почву и водную среду множество вредных веществ. А при его сжигании, даже в специальных дорогостоящих печах, в атмосферу выбрасывается большое количество вредных веществ.

Пиролиз – наиболее перспективное направление термической переработки пластиковых отходов, входящих в состав твердых бытовых отходов (ТБО). Перспектива является обоснованной с точки зрения как экологической безопасности, так и получения полезных товарных продуктов.

Превращение пластмассовых отходов из состава ТБО в топливо путем пиролиза длинноцепочечных углеводородных фрагментов в короткоцепочечные имеет ряд преимуществ: активизирует новый цикл потребления невозобновляемых источников энергии; обеспечивает значительный источник нефтехимии, что снижает расход невозобновляемых энергоресурсов; является эффективным инновационным альтернативным решением для ликвидации отходов, предотвращая загрязнение окружающей среды продуктами их сжигания, или пополнения свалок, загрязняющих как атмосферу, так и водную среду.

Продуктами термического разложения пластмасс являются:

- пиролизный газ, содержащий водород, оксид углерода, метан, которые используются в качестве сырья для синтеза метанола, амиака, оксоспиртов или других химических веществ, а также в качестве топлива;

- коксовый остаток (отход 4–5-го класса опасности, входит в состав смесей, используемых в строительстве и рекультивации);

- синтетическая нефть (на ее основе возможно получение дизельного топлива и компонентов бензина).

В качестве перспективного направления утилизации полимерсодержащих отходов использован пиролиз смесевых составов, содержащих торф с требующими переработки полимерами [1].

Определяющим способом переработки таких отходов является термохимическое воздействие (пиролиз, газификация), в результате которого целевыми продуктами становятся полученные новые более качественные виды химического сырья или топлива с максимально большой теплотой сгорания, что определяется природой материала, условиями процесса и в конечном итоге глубиной конверсии органического вещества. Одним из важных факторов, определяющих глубину конверсии процесса, является использование различных катализаторов.

Цель работы – провести анализ эффективности действия различных по природе катализаторов на глубину конверсии торфополимерных композиций при стационарном пиролизе торфа. Глубину конверсии оценивали по балансу выхода продуктов термолиза.

Известно, что катализаторами разложения углеводородного сырья являются переходные металлы. Для ряда реакций, таких как изомеризация, полимеризация, присоединение, замещение и разложение, протекающих, как правило, по гетеролитическому механизму, широко применяются соли металлов подгруппы железа [2–5].

Для переходных металлов характерна способность к образованию соединений в различных степенях окисления. Так, ион d-металла имеет девять валентных орбиталей, доступность которых позволяет ему образовывать как σ-, так и π-связи с другими молекулами или лигандами. Способность к быстрому переходу из одного состояния окисления в другое является важной в ходе протекания катализитической реакции.

Лиганды, входящие в координационную сферу, способны оказывать значительное влияние на катализитические свойства металла, поскольку существенно меняют свойства металла-комплексообразователя (эффективный заряд, донорно-акцепторную способность и др.), причем некоторые лиганды могут привести к потере активности [6].

Наличие в катализитической системе в качестве лигандов, например, хлорид-анионов ускоряет процесс термодеструкции. Это объясняется тем фактом, что ион хлора при повышенной температуре теряет электрон и превращается в радикал хлора, который, в свою очередь, выступает инициатором деструкции [7].

При высоких температурах возможно взаимодействие ионов d-металлов с субстратом, что может приводить к образованию реакционноспособных карбокатионов. Это имеет важное значение, поскольку при термодеструкции таких полимеров, как полиэфиры, полиуретаны и полiamиды, возможно изменение механизма протекания процесса термодеструкции с радикального на ионный. Изменение основного механизма термодеструкции полимера с радикального на ионный может способствовать увеличению скоростей распада полимеров, содержащих полярные функциональные группы в основной полимерной цепи [6].

Результаты и их обсуждение. Был проведен ряд экспериментальных исследований по термохимическому разложению торфополимерных композиций в присутствии катализаторов для изучения полноты термического разложения с получением жидких, твердых и газообразных продуктов и составления баланса при различных условиях течения процесса.

В состав компонентов торфополимерных композиций входили: торф низинный ($W = 8,9\%$; $A^c = 2,0\%$); полиэтилен низкого давления (LDPE); полипропилен (PP); полистирол (PS). В качестве катализитических добавок были использованы хлориды переходных металлов – кобальта, марганца и железа.

Подготовка образцов к эксперименту заключалась в измельчении и усреднении горючих компонентов торф : полимер в весовых соотношениях 80 : 20, внесении рассчитанного количества катализатора в виде раствора в образец, тщательном перемешивании и затем высушивании до естественной влажности. Доза внесения катализатора во всех случаях составляла 2 % исходной соли на торфополимерную смесь естественной влажности. При пересчете на чистый металл дозы внесения были следующие: по кобальту и никелю – 0,90 %, по марганцу – 0,56, по железу – 0,42 %. Пиролиз подготовленного образца проводили при температуре 700 °C.

Полученные количественные параметры выхода продуктов пиролиза торфополимерных смесевых составов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Выход продуктов каталитического пиролиза торфополимерных композиций

Table 1. Output of the products of the catalytic pyrolysis of peat polymeric compositions

Состав пиролизной смеси	Жидкие продукты (смола + вода)	Коксозольный остаток	Пиролизный газ
Торф ($W = 8,9\%$, $A^c = 2,0\%$)	35,2	36,0	28,8
Торф + $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29,7	40,2	30,1
Торф + $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	33,7	40,5	25,8
Торф + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	31,5	38,9	29,6
Торф + LDPE + $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37,9	31,7	30,3
Торф + LDPE + $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	43,7	31,8	24,5
Торф + LDPE + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33,3	33,3	33,4
Торф + PP + $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	43,4	28,3	28,3
Торф + PP + $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	43,4	31,6	25,0
Торф + PP + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	41,5	30,1	28,4
Торф + PS + $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	41,3	32,6	26,1
Торф + PS + $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	44,8	30,0	25,2
Торф + PS + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	38,1	35,1	26,8

Терморазложение проводили на установке стационарного пиролиза при температуре 700 °C. Из табл. 1 следует, что в целом каталитические добавки ускоряют процесс термодеструкции органического материала торфа и полимера. Полноту термодеструкции торфополимерных композиций (глубину конверсии) оценивали по выходу твердой фракции после пиролиза. По данным табл. 1, у торфа с различными катализаторами она составляла порядка 40 %, а у торфополимерных композиций – около 30 %, что указывает на существенно большую глубину конверсии органического материала. Причем продукты являются наиболее энергоемкими и содержатся в газовой и жидкой фракциях, существенно увеличивая их теплотворную способность.

Таким образом, в результате проведенных исследований образцов состава (торф, отходы полимера, катализатор) в стационарном слое топлива обнаружено существенное увеличение глубины конверсии органического вещества в присутствии катализаторов (соли кобальта, марганца, железа), на что указывает снижение выхода коксозольного остатка, составляющее по балансу до 25 % органического материала у трехкомпонентных полимерных композиций по сравнению с образцами без полимерных добавок.

С целью более детального изучения продуктов термодеструкции трехкомпонентных смесевых композиций был определен качественный и количественный состав исследованных образцов пиролизного газа, рассчитаны их теплоты сгорания и проведен сравнительный анализ, представленный в табл. 2.

Ранее в наших исследованиях были проведены пробные эксперименты по влиянию соотношения торф : полимер, которые показали, что выход пиролизного газа пропорционально зависит от содержания в смеси полимера. Относительно большее содержание отходов полимера в композиционной среде торф : полимер : катализатор существенно оказывается на теплотворной способности образующегося пиролизного газа.

Таблица 2. Состав газа каталитического пиролиза торфополимерных композиций**Table 2. The content of gas of the catalytic pyrolysis of peat polymeric compositions**

Образец	Компоненты, входящие в состав газа пиролиза, об. %					Плотность газа, г/л	Теплота сгорания газа, ккал/нм ³
	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄		
Исходный торф (W = 8,9 %, A ^c = 2,0%)	31,1	0,6	36,1	21,6	10,5	1,1696	1885
Торф + LDPE	42,6	2,2	16,5	20,4	18,3	1,2292	2897
Торф + PP	40,1	2,4	22,2	16,5	18,8	1,2550	3028
Торф + PS	19,1	2,0	42,6	19,6	16,7	1,2356	3502
Торф + CoCl ₂ · 6H ₂ O	31,0	0,6	19,8	28,4	20,2	1,0391	3140
Торф + MnCl ₂ · 4H ₂ O	50,4	5,7	16,3	14,7	12,9	1,3885	2763
Торф + FeCl ₃ · 6H ₂ O	36,0	1,9	17,7	16,2	28,2	1,1773	3628
Торф + LDPE + CoCl ₂ · 6H ₂ O	31,8	3,2	16,9	28,4	19,7	1,0544	3366
Торф + LDPE + MnCl ₂ · 4H ₂ O	47,1	2,5	15,5	15,7	19,2	1,3132	2856
Торф + LDPE + FeCl ₃ · 6H ₂ O	43,9	1,8	16,3	20,3	17,7	1,4076	2777
Торф + PP + CoCl ₂ · 6H ₂ O	31,7	3,6	33,4	17,6	13,7	1,2118	3137
Торф + PP + MnCl ₂ · 4H ₂ O	41,5	1,8	30,4	14,9	11,4	1,3213	2540
Торф + PP + FeCl ₃ · 6H ₂ O	32,4	4,0	32,0	18,2	13,4	1,2114	3139
Торф + PS + CoCl ₂ · 6H ₂ O	27,5	1,3	22,8	15,6	32,8	1,0960	4068
Торф + PS + MnCl ₂ · 4H ₂ O	44,1	1,3	17,4	21,1	16,1	1,2425	2624
Торф + PS + FeCl ₃ · 6H ₂ O	38,8	1,5	34,6	15,6	9,5	1,3038	2472

При количественном анализе состава газа пиролиза образцов, содержащих отходы полимеров, отчетливо наблюдается существенное увеличение доли углеводородной составляющей (C_nH_m, CH₄). Как видно из данных табл. 2, при пиролизе двухкомпонентной системы (торф + 20 % полимера) выход углеводородов возрастает в 4 раза (0,6 % для исходного торфа и 2,4 % для смеси торф + PP), а при использовании катализаторов – до 6 раз (3,6 % для смеси торф + PP + Co). Увеличение выхода метана несколько меньше (от 10,5 % для исходного торфа до 19,7 % для трехкомпонентной смеси торф + + LDPE + Co), но достигает 1,5–2,0 раза.

Такое изменение в компонентном составе газа и вносит наибольший вклад в суммарную теплоту сгорания пиролизного газа (табл. 3). Анализ представленных в табл. 3 теплот сгорания пиролизного газа исследованных трехкомпонентных смесевых составов показывает, что увеличение калорийности газа пиролиза в образцах, содержащих 20 мас.% отходов полимеров, составляет от 1,5 до 2,0 раза.

Устойчивой зависимости между выходом пиролизного газа и составом пиролизуемых трехкомпонентных систем, а также природой полимера нами пока не установлено.

Таблица 3. Термодинамические характеристики пиролиза торфополимерных композиций**Table 3. The warmth of the gas burning of the catalytic pyrolysis of peat polymeric compositions**

Образец	Выход пиролизного газа, %	Теплота сгорания, ккал/нм ³	Увеличение калорийности пиролизного газа, %
Исходный торф	28,8	1885	100
Торф + LDPE	30,1	2897	154
Торф + PP	25,8	3028	161
Торф + PS	29,6	3502	186
Торф + CoCl ₂ · 6H ₂ O	33,9	3140	167
Торф + MnCl ₂ · 4H ₂ O	33,4	2763	147
Торф + LDPE + CoCl ₂ · 6H ₂ O	30,3	3366	179
Торф + LDPE + MnCl ₂ · 4H ₂ O	27,8	2856	153
Торф + LDPE + FeCl ₃ · 6H ₂ O	33,4	2777	147
Торф + PP + CoCl ₂ · 6H ₂ O	24,5	3137	167
Торф + PP + MnCl ₂ · 4H ₂ O	31,6	2540	138
Торф + PP + FeCl ₃ · 6H ₂ O	25,0	3139	167
Торф + PS + CoCl ₂ · 6H ₂ O	26,1	4068	216
Торф + PS + MnCl ₂ · 4H ₂ O	25,2	2624	139
Торф + PS + FeCl ₃ · 6H ₂ O	26,8	2472	131

Заключение. Одним из способов переработки низкокачественных твердых горючих ископаемых, биомассы и органосодержащих отходов является пиролиз, в результате чего целевыми продуктами становятся полученные новые более качественные виды химического сырья или топлива с максимально большой теплотой сгорания. Одним из важных факторов, определяющих глубину конверсии данного процесса, является использование катализаторов разложения углеводородного сырья – солей металлов подгруппы железа.

Установлено, что при пиролизе торфополимерных композиций в присутствии катализаторов (соли кобальта, марганца, железа) в стационарном слое обнаружено значительное увеличение глубины конверсии органического вещества, выражющееся в снижении баланса содержания коксозольного остатка до 25 % органического материала.

В результате каталитического пиролиза торфополимерных композиций наиболее энергоемкими являются продукты, содержащиеся в газообразной и жидкой фракциях. Добавка полимера в присутствии катализатора приводит к увеличению их теплотворной способности. Так, при термохимической деструкции торфополимерных систем в образцах, содержащих до 20 мас.% отходов полимеров увеличение калорийности пиролизного газа повышается в 1,5–2,0 раза.

На основании результатов экспериментов с получением калорийного пиролизного газа (целевой продукт) и твердого коксозольного остатка перспективным представляется способ утилизации полимерных отходов каталитическим пиролизом в виде их смесевых составов с последующим получением также сырья для создания сорбентов очистки загрязненных вод от тяжелых металлов-поллютантов. В настоящее время образующийся при пиролизе твердый остаток используется как отход, рекомендуемый, по возможности, к применению в качестве дорожного или строительного материала, если отвечает экологическим критериям.

Список использованных источников

1. Утилизация полимерных отходов пиролизом торфополимерных композиций / И. И. Лиштван [и др.] // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 21–32.
2. Катализ в промышленности : в 2 т. / ред. Б. Лич ; пер с англ. под ред. В. М. Грязнова. – М. : Мир, 1986. – Т. 1. – 326 с. ; Т. 2. – 231 с.
3. Сеттерфилд, Ч. Практический курс гетерогенного катализа ; пер. с англ. / Ч. Сеттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 520 с.
4. Накамура, А. Принципы и использование гомогенного катализа ; пер. с англ. / А. Накамура, М. Цуци. – М. : Мир, 1983. – 231 с.
5. Боресков, Г. К. Гетерогенный катализ / Г. К. Боресков. – М. : Наука, 1986. – 303 с.
6. Кузнецов, Б. Н. Катализ химических превращений угля и биомассы / Б. Н. Кузнецов. – Новосибирск : Наука, 1990. – 301 с.
7. Shinya, Yokoyama. Pyrolysis of wet cellulose containing biomass to produce hydrogen / Shinya Yokoyama, Ogi Tomoko, Minowa Tomoaki ; National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST. – Brit. UK Pat. Appl., 1997. – 14 p.

References

1. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Kraiko V. M, Anufrieva E. V. *Utilizatsya polimernykh otkhodov pirolyzom torfopolimerov kompozitsiy* [Utilization of polymer waste by pyrolysis of peat polymer compositions]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 21–32. (in Russian)
2. Kataliz v promyshlennosti : v 2 t. [Catalysis in the industry : in 2 vol.]. Ed. B. Lich, Translated from English, ed. by V. M. Gryaznov. Moscow, Mir Publ., 1986, vol. 1, 326 p. ; vol. 2, 231 p. (in Russian)
3. Setterfield C. H. *Prakticheskij kurs geterogennogo kataliza* [Practical course of heterogeneous catalysis]. Moscow, Mir Publ., 1984, 520 p. (in Russian)
4. Nakamura A., Cucui M. *Principy i ispol'zovanie gomogenного kataliza* [Principles and use of homogeneous catalysis]. Moscow, Mir Publ., 1983, 231 p. (in Russian)
5. Boreskov G. K. *Geterogennyj kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 303 p. (in Russian)
6. Kuznetcov B. N. *Kataliz himicheskikh prevrashchenij uglya i biomassy* [Catalysis of chemical transformations of coal and biomass]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 301 p. (in Russian)
7. Shinya Yokoyama, Tomoko Ogi, Tomoaki Minowa. Pyrolysis of wet cellulose containing biomass to produce hydrogen. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST. Brit. UK Pat. Appl., 1997, 14 p.

Информация об авторах

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

Дударчик Владимир Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudwm@tut.by

Крайко Валентина Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: vv kraiko@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

Ivan I. Lishtvan – Academician, D. Sc. (Technical), 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 M. Dudarchyk – 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: dudwm@tut.by

Valiantsina M. Kraiko – 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: vv kraiko@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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОТРАНСПОРТА САПРОПЕЛЯ

**Б. В. Курзо, В. Б. Кунцевич, О. М. Гайдукевич, Т. И. Макаренко,
И. В. Агейчик, А. Ю. Татков, Л. П. Калилец**

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Предлагаемая технология скважинной гидродобычи сапропеля, залегающего под слоем торфа, не имеет аналогов, и поэтому установление качественных показателей сапропелевой пульпы, параметров трубопроводного транспорта и технических характеристик оборудования имеет важное значение, как научное, так и практическое. Расчет гидродобычи сапропеля выполнен на конкретном примере с учетом реальных условий залегания сапропеля под торфом и его общетехнических свойств. Установлено, при добывче сапропеля, залегающего под слоем торфа на месторождении Гала-Ковалевское, для достижения требуемой консистенции пульпы необходимо на 1 т сапропеля добавить 3,4 т воды. Расчет фактического значения параметра Рейнольдса позволил выявить, что при принятых исходных данных наблюдается ламинарный режим течения сапропелевой пульпы. При внутреннем диаметре трубопровода 0,2 м и длине 1000 м расчетная мощность генератора, питающего электроэнергией механизмы добывающей установки, составляет 60 кВт, а суммарная мощность нагнетательного и всасывающего насосов – 54 кВт.

Ключевые слова: сапропель; торф; скважинная гидродобыча; трубопроводный транспорт; центробежные насосы; добывающая установка.

Для цитирования. Курзо Б. В., Кунцевич В. Б., Гайдукевич О. М., Макаренко Т. И., Агейчик И. В., Татков А. Ю., Калилец Л. П. Теоретические основы расчета и обоснование гидротранспорта сапропеля // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 187–197.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR CALCULATION AND SUBSTANTIATION OF HYDROTRANSPORT OF SAPROPEL

**B. V. Kurzo, V. B. Kuntsevich, O. M. Gaidukevich, T. I. Makarenko,
I. V. Ageichik, A. Yu. Tatkov, L. P. Kalilets**

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

Abstract. The proposed technology of borehole hydraulic extraction of sapropel under a layer of peat has no analogues, and therefore the establishment of quality indicators of sapropel pulp, parameters of pipeline transport and technical characteristics of equipment is of great scientific and practical importance. The calculation of hydroextraction of sapropel is carried out on a specific example, taking into account the actual conditions of occurrence of sapropel under peat and its general technical properties. It has been established that during the extraction of sapropel lying under a layer of peat at Gala-Kovalevskoye deposit, in order to achieve the required pulp consistency, it is necessary to add 3.4 tons of water per 1 ton of sapropel. The calculation of the actual value of the Reynolds parameter made it possible to reveal that, with the accepted initial data, a laminar flow regime of the sapropel pulp is observed. With an internal diameter of the pipeline of 0.2 m and a length of 1000 m, the calculated power of the generator supplying the mechanisms of the mining installation with electricity is 60 kW, and the total power of the pressure and suction pumps is 54 kW.

Keywords: sapropel; peat; borehole hydroextraction; pipeline transport; centrifugal pumps; extraction unit.

For citation. Kurzo B. V., Kuntsevich V. B., Gaidukevich O. M., Makarenko T. I., Ageichik I. V., Tatkov A. Yu., Kalilets L. P. Theoretical foundations for calculation and substantiation of hydrotransport of sapropel. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 187–197.

Введение. Разработка залегающего под торфом сапропеля по существующим технологиям имеет ряд существенных недостатков, что снижает технико-экономические показатели его добычи. Для извлечения сапропеля торфяное месторождение (участок) необходимо осушить, свести древесную и кустарниковую растительность, выполнить корчевку торфяной залежи, удалить прикрывающий сапропель слой торфа, что приводит к значительному удорожанию сапропелевого сырья.

Технология скважинной гидромеханизированной добычи залегающего под торфом сапропеля позволит значительно сократить производственные затраты как на стадии освоения месторождения за счет частичного исключения этапов болотно-подготовительных работ, так и на стадии его эксплуатации за счет применения ресурсосберегающего трубопроводного транспорта подачи сапропеля на участок сушки или непосредственно на переработку. Кроме того, указанная технология будет иметь экологические преимущества перед известными технологиями за счет минимального воздействия на болотные ландшафты [1].

Анализ литературных и патентных источников показал, что на данном этапе развития технических возможностей скважинная технология гидродобычи сапропеля (СГДС) наиболее полно отвечает современным тенденциям успешного освоения данного природного ресурса [1–3]. Положительным фактором является и то, что в Республике Беларусь расположено 487 выбывших из эксплуатации торфяных месторождений, на которых ранее выполнены детальные геологоразведочные работы, где под слоем оставшегося торфа залегает сапропель, объем которого равен 574 млн м³ [4]. Значительную часть общего объема составляет органический сапропель, который вследствие низкой зольности имеет высокую влажность, и поэтому добыча его с помощью средств гидромеханизации наименее затратная.

Гидромеханизированный способ добычи сапропеля базируется на размыве отдельных генетических слоев залежи тонкими струями воды высокого давления с одновременным (или раздельным) заасасыванием полученной пульпы и дальнейшим ее транспортированием по трубопроводам на поля сушки (отстойники).

Необходимо отметить, что в опубликованных материалах нет источника, в котором достаточно полно изложен расчет гидротранспорта полезных ископаемых, в том числе торфа или сапропеля. Наиболее глубоко этот вопрос рассмотрен в работах [3, 5]. Однако и в них отсутствует ряд положений, которые необходимы для расчета, в особенности того, что касается определения конструктивных параметров технологического оборудования. Данная статья имеет практическую направленность, так как, по мнению авторов, в ней в доступной форме изложен материал, который содержит основные сведения, необходимые для инженерных расчетов гидромеханизированной добычи погребенного сапропеля.

Методы исследований включают анализ опубликованных материалов по гидромеханизированной добыче полезных ископаемых, отбор проб сапропеля на опытном участке, лабораторные исследования, теоретические расчеты.

Результаты исследований. В текущем году Институтом природопользования НАН Беларусь планируется приобрести оборудование и организовать опытный участок для проведения исследований по скважинной гидродобыче сапропеля. Учитывая изложенное, в первую очередь необходимо выполнить теоретический расчет с целью установления необходимых параметров сапропелевой гидросмеси и трубопроводного транспорта, а также технических характеристик оборудования.

Расчет СГДС выполнен на примере сапропеля, залегающего под слоем торфа на месторождении Гала-Ковалевское со следующими общетехническими характеристиками:

Мощность оставшегося слоя торфа, м	1,9
Средняя мощность сапропеля, м	1,6
Зольность сапропеля (A°), %	51,1
Относительная влажность сапропеля, %	73,4

Принято, что для транспортирования сапропеля в виде гидросмеси магистральный трубопровод изготовлен из стальных толстостенных труб на сварном соединении диаметром 0,2 м. Расстояние до отстойника – 1000 м.

Ранее проведенными исследованиями установлена рациональная зона реологических параметров гидросмеси [5]:

$$0 < \Theta_g < 30, \quad (1)$$

где Θ_g – динамическое начальное напряжение сдвига, н/м².

В этих пределах из условия энергозатрат гидротранспорт легких гидросмесей целесообразен. При $\Theta_g > 30$ н/м² гидротранспорт центробежными насосами экономически не выгоден. Существенное значение при СГДС имеет относительная влажность сапропелевой пульпы, от которой в значительной степени зависит рентабельность производства. В большинстве случаев указывается, что данный показатель должен быть не менее 94 % [2, 5]. Другие исследователи полагают, что гидротранспорт сапропеля возможен и при влажности 90 % [1].

В нашем случае относительная влажность сапропеля равна 73,4 %. Чтобы повысить ее до среднестатистического значения 94 %, необходимо на 1 т сапропеля добавить воды, количество которой рассчитывается по формуле

$$m = \frac{m_1(100 - w_1)}{100 - w_2} - 1, \quad (2)$$

где m – количество добавленной воды на 1 т сапропеля, т; m_1 – масса сапропеля при влажности w_1 , т; w_2 – влажность гидросмеси, %.

$$m = \frac{1 \cdot (100 - 73,4)}{100 - 94} - 1 = 3,4 \text{ т.}$$

Плотность гидросмеси, т/м³:

$$\rho_{cm} = \rho_w [w_2 + (1 - w_2)(1,34 + 0,12A^c)], \quad (3)$$

где ρ_w – плотность воды, т/м³; w_2 и A^c – влажность и зольность гидросмеси соответственно, долей единицы.

$$\rho_{cm} = 1 \cdot [0,94 + (1 - 0,94)(1,34 + 0,12 \cdot 0,511)] = 1,024 \text{ т/м}^3.$$

Используя фактические значения относительной влажности гидросмеси и зольности на сухое вещество по номограмме установлено, что при градиенте скорости сдвига $\varepsilon = \frac{dv}{dr} = 0$ в диапазоне от 0 до 30 н/м² начальное динамическое касательное напряжение (Θ_g) равно 5 н/м² [5, рис. 3].

Статическое начальное напряжение сдвига, н/м²:

$$\tau_0 = \frac{3}{4} \Theta_g. \quad (4)$$

$$\tau_0 = \frac{3}{4} \cdot 5 = 3,75 \text{ н/м}^2.$$

В соответствии с графиком структурная вязкость гидросмеси в зависимости от Θ_g равна 0,003 н·с/м² [5, рис. 5].

Гидравлический транспорт сапропелевых гидросмесей возможен при двух режимах течения – ламинарном и турбулентном. Если обобщенный параметр Рейнольдса (R_e) находится в границах 1600–5000, наблюдается ламинарный режим течения, при несоблюдении этих пределов – турбулентный [5].

Параметр Рейнольдса

$$R_e = \frac{1}{\frac{h_i}{\rho_{cm} V_{cm} D} + \frac{\tau_0}{8 V_{cm}^2 \rho_{cm}}}, \quad (5)$$

где h_i – структурная вязкость, н·с/м²; V_{cm} – скорость течения гидросмеси, м/с; D – диаметр трубопровода, м.

$$V_{cm} = 0,8v, \quad (6)$$

где $v = 1,9$ м/с – средняя скорость течения воды в трубопроводе диаметром 0,2 м [6].

$$V_{cm} = 0,8 \cdot 1,9 = 1,52 \text{ м/с.}$$

$$R_e = \frac{1}{\frac{0,003}{1024 \cdot 1,52 \cdot 0,2} + \frac{3,75}{8 \cdot 1,52^2 \cdot 1024}} = 4761.$$

Гидравлический уклон при движении гидросмеси в ламинарном режиме

$$i = \frac{4\tau_w}{D\rho_{cm}q}, \quad (7)$$

где τ_w – максимальное напряжение сдвига на стенке трубопровода, соответствующее фактическому градиенту скорости сдвига (ε), Н/м²; q – ускорение свободного падения, м/с².

Градиент скорости сдвига

$$\varepsilon = \frac{dv}{dr} = \frac{8V_{cm}}{D} = \frac{8 \cdot 1,52}{0,2} = 60,8. \quad (8)$$

Известно, что течение сапропелевых гидросмесей с достаточной точностью может быть описано уравнением Шведова – Бингама [5]:

$$\tau_w = \Theta_g + \varepsilon h_i, \quad (9)$$

$$\tau_w = 5 + 60,8 \cdot 0,003 = 5,2 \text{ Н/м}^2,$$

$$i = \frac{4 \cdot 5,2}{0,2 \cdot 1024 \cdot 9,81} = 0,0104.$$

Предельное напряжение сдвига гидросмеси, Н/м²:

$$\tau_c = 10^{-5} \cdot (100 - A^c) \cdot e^{2,6C_o}, \quad (10)$$

где C_o – содержание органического вещества в гидросмеси, %; $e = 2,7$ – основание натурального логарифма.

$$C_o = C_c(1 - 0,01A^c), \quad (11)$$

где C_c – содержание сухого вещества в гидросмеси, %.

$$C_c = 100 - w_2 = 100 - 94 = 6 \%, \quad (12)$$

$$C_o = 6 \cdot (1 - 0,01 \cdot 51,1) = 2,9 \%,$$

$$\tau_c = 10^{-5} \cdot (100 - 51,1) \cdot 2,7^{2,6 \cdot 2,9} = 0,88 \text{ Н/м}^2.$$

Для полной характеристики трубопровода с заданными параметрами необходимо определить гидравлический радиус (R) и коэффициент Шези (C).

Для трубопровода круглого сечения

$$R = \frac{D}{4} = \frac{0,2}{4} = 0,05 \text{ м}; \quad (13)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (14)$$

где $n = 0,011$ – коэффициент шероховатости [5].

$$C = \frac{1}{0,011} \cdot 0,05^{0,17} = 55,09.$$

Расчет основных характеристик нагнетательного насоса.

К основным техническим параметрам любого водного насоса относятся:

1) производительность (расход) агрегата – величина объема жидкости, подаваемая насосом за определенный промежуток времени;

2) напор – величина удельной энергии, сообщаемая насосом условной единице массы перекачиваемой жидкости. Напор можно представить, как высоту, на которую может быть поднят 1 кг перекачиваемой жидкости за счет энергии, сообщаемой ей агрегатом;

3) установочная мощность агрегата – энергия, которая подводится к насосу от электродвигателя с учетом коэффициентов полезного действия насоса и электродвигателя, а также возможной перегрузки в момент запуска.

Исходные данные:

- расстояние от водоема до добывающей установки – 100 м;
 - диаметр трубы, по которой вода подается к насосу – 0,1 м;
 - длина рукава от насоса до сапропеля – 10 м;
 - диаметр рукава – 0,1 м;
 - геометрическая разность высот водоема и насоса – 4 м;
 - геометрическая разность высот между осью ротора насоса и центральным слоем сапропеля – 5 м.
- Расход воды через заданный трубопровод, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q_B = \frac{\pi D_H^2}{4} V_B, \quad (15)$$

где D_H – внутренний диаметр трубопровода, м; V_B – скорость течения воды в трубопроводе, $\text{м}/\text{с}$ [7].

$$Q_B = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 2,5 = 0,0196 \text{ м}^3/\text{с} = 70,7 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Учитывая, что на 1 т сапропеля необходимо добавить 3,4 т воды, чтобы повысить влажность сапропеля с 73,4 до 94,0 %, за 1 ч количество гидросмеси требуемой консистенции составит 21,3 т, или 20,8 м^3 .

Скоростной напор в трубопроводе, м:

$$H_c = \frac{V_B^2}{2g}. \quad (16)$$

$$H_c = \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} = 0,3185 \text{ м.}$$

Гидравлические потери напора. Гидравлические потери возникают вследствие потерь напора на трение и местные сопротивления.

Сопротивление трению обусловлено различного рода неровностями и шероховатостями на внутренней поверхности трубопровода, соприкасающейся с перекачиваемой средой, что требует дополнительных затрат энергии на преодоление данного негативного явления.

Местные сопротивления создаются различными элементами трубопровода, в которых поток перекачиваемой среды подвергается резким деформациям с изменением направления, скорости или образованием завихрений. Это могут быть задвижки, вентиля, повороты трубопровода и т. п.

Потери напора на трение, м:

$$H_t = (K_t l_0) / D_H [V_B^2 / (2g)], \quad (17)$$

где $K_t = 0,032$ – коэффициент трения [8]; $l_0 = 110$ – общая длина трубопровода и рукава, м.

$$H_t = (0,032 \cdot 110) / 0,1 \cdot [2,5^2 / (2 \cdot 9,81)] = 11,21 \text{ м.}$$

Потери напора на местные сопротивления, м:

$$H_m = \sum K_m [v_b^2 / (2g)], \quad (18)$$

где K_m – коэффициенты местных сопротивлений.

В нашем случае при подаче воды из озера (канала) в залежь сапропеля элементы трубопровода, создающие условия для местных сопротивлений, практически отсутствуют (за исключением угла изменения потока при входе и выходе из насоса), поэтому потерей напора на преодоление сопротивлений можно пренебречь [7].

Общий напор, м:

$$H_o = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^5}{\rho_b g} + H_t + h_1 - h_2, \quad (19)$$

где P_2 – избыточное давление под торфом, создаваемое нагнетательным насосом, бар [8]; P_1 – давление в открытом водоеме с водой, бар; ρ_b – плотность воды, кг/м³; h_1 – геометрическая разность высот водоема и насоса, м; h_2 – геометрическая разность высот между осью ротора насоса и центральным слоем сапропеля, м.

Знак «минус» свидетельствует, что насос расположен выше залежи сапропеля:

$$H_o = \frac{(8-1) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} + 11,21 + 4 - 5 = 81,56 \text{ м.}$$

Полезная мощность электродвигателя насоса

$$N_n = \rho_b q Q_b H_o. \quad (20)$$

$$N_n = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0196 \cdot 81,56 = 15\ 682 \text{ Вт.}$$

Необходимая мощность электродвигателя, Вт:

$$N_h = N_n / (\eta_h \eta_d), \quad (21)$$

где $\eta_h = 0,78$ – коэффициент полезного действия насоса [9]; $\eta_d = 0,95$ – коэффициент полезного действия электродвигателя [9.]

$$N_h = 15\ 682 / (0,78 \cdot 0,95) = 21\ 163 \text{ Вт.}$$

Установочная мощность электродвигателя с учетом возможной перегрузки в момент запуска

$$N = \beta N_h, \quad (22)$$

где $\beta = 1,2$ – коэффициент запаса мощности [9].

$$N = 1,2 \cdot 21\ 163 = 25\ 396 \text{ Вт} \approx 26 \text{ кВт.}$$

Расчет основных характеристик землесосного насоса.

Расход гидросмеси в трубопроводе, м³/с:

$$Q_{cm} = Q_b' K_h, \quad (23)$$

где Q_b' – расход воды, в случае прохождения ее через заданный трубопровод, м³/с; $K_h = 0,8$ – коэффициент, учитывающий снижение производительности насоса при работе на гидросмеси с содержанием сухого вещества свыше 2 % [9].

$$Q_b' = \frac{\pi D^2}{4} v = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 1,9 = 0,0596 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{\text{см}} = 0,0596 \cdot 0,8 = 0,048 \text{ м}^3/\text{с} = 171,6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Скоростной напор в трубопроводе, м:

$$H_c = \frac{V_{\text{см}}^2}{2g}. \quad (24)$$

$$H_c = \frac{1,52^2}{2 \cdot 9,81} = 0,118 \text{ м.}$$

Потери напора на трение, м:

$$H_t = (K_t L) / D \left[V_{\text{см}}^2 / (2g) \right], \quad (25)$$

где L – длина трубопровода, м.

$$H_t = (0,032 \cdot 1000) / 0,2 \left[1,52^2 / (2 \cdot 9,81) \right] = 18,9 \text{ м.}$$

Потери напора на местные сопротивления. При расчете принято, что сапропелевая гидросмесь землесосным насосом перекачивается по горизонтальному трубопроводу диаметром 0,2 м, имеющему два вентиля, два колена по 90° и свободно выливается из трубы в отстойник.

В этом случае коэффициенты местных сопротивлений равны [7]: колено – 1,1; нормальный вентиль (полное открытие) – 4,7; выход из трубы – 1,0.

$$H_m = (2 \cdot 1,1 + 2 \cdot 4,7 + 1) \cdot \frac{V_{\text{см}}^2}{2g} = 12,6 \cdot \frac{1,52^2}{2 \cdot 9,81} = 1,5 \text{ м.}$$

Общий напор, создаваемый землесосным насосом в трубопроводе, м:

$$H_o = \frac{(P_3 - P_4) \cdot 10^5}{\rho_{\text{см}} g} + h_1 + H_t + H_m, \quad (26)$$

где P_3 – давление на поверхности сапропелевой гидросмеси в отстойнике, бар; P_4 – давление сапропелевой гидросмеси под торфом, бар [6]; h_1 – геометрическая разность высот между поверхностью гидросмеси в отстойнике и центральным слоем сапропеля под торфом, м.

$$H_o = \frac{(1 - 0,5) \cdot 10^5}{1024 \cdot 9,81} + 10 + 18,9 + 1,5 = 35,4 \text{ м.}$$

Полезная мощность электродвигателя всасывающего насоса

$$N_n = \rho_{\text{см}} g Q_{\text{см}} H_o = 1024 \cdot 9,81 \cdot 0,048 \cdot 35,4 = 17\,069 \text{ Вт.}$$

Необходимая мощность электродвигателя

$$N_g = 17\,069 / (0,78 \cdot 0,95) = 23\,035 \text{ Вт.}$$

Установочная мощность электродвигателя с учетом возможной перегрузки в момент запуска

$$N = \beta N_g = 1,2 \cdot 23\,035 = 27\,642 \text{ Вт} \approx 28 \text{ кВт.}$$

Заводская характеристика центробежных насосов содержит сведения по перекачке воды, поэтому для определения типоразмера насоса необходимо перейти от параметров для перекачки сапропелевой гидросмеси к параметрам для перекачки воды.

Для нагнетательного насоса все необходимые параметры установлены. Также установлен расход по сапропелевой пульпе и воде землесосного насоса. Необходимо определить напор, создаваемый землесосным насосом по воде, м:

$$H_B = \frac{H_o}{f_H}, \quad (27)$$

где f_H – переводной коэффициент для вязких сред. Определяется по диаграмме с учетом расхода, напора, кинематической вязкости сапропелевой пульпы, частоты вращения и удельной частоты вращения [10, п. 9–11].

Кинематическая вязкость пульпы, м²/с:

$$\nu = \nu_n + (\nu_o - \nu_n) \left(1 - \frac{f}{f_o} \right)^2, \quad (28)$$

где ν_n – кинематическая вязкость пульпы предельно разрушенной структуры, м²/с; ν_o – кинематическая вязкость пульпы ненарушенной структуры при $\epsilon \rightarrow 0$, м²/с; f – скорость деформации пульпы, м/с; f_o – скорость деформации, при которой достигается предельное разрушение структуры пульпы, м/с.

$$\nu_n = \nu_B (1 + C_o^2), \quad (29)$$

где $\nu_B = 10^{-6}$ – кинематическая вязкость воды, м²/с.

$$\nu_n = \frac{1}{1000000} \cdot (1 + 2,9^2) = 0,0001 \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\nu_o = (1 + C_o^2) \nu_n = (1 + 2,9) \cdot 0,0001 = 0,0004 \text{ м}^2/\text{с},$$

$$f_o = 600 C_o^2 = 600 \cdot 2,9^2 = 5046 \text{ м/с},$$

$$f = m \frac{\nu_{cm}}{D}, \quad (30)$$

где $m = 8$ – при ламинарном движении пульпы [11].

$$f = 8 \cdot \frac{1,52}{0,2} = 60,8 \text{ м/с},$$

$$\nu = 0,0001 + (0,0004 - 0,0001) \cdot \left(1 - \frac{60,8}{5046} \right)^2 = 0,0004 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Удельная частота вращения, с⁻¹:

$$n_q = 333 \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{\sqrt{Q_{cm}}}{(qH_o)^{3/4}}, \quad (31)$$

где n – частота вращения, мин⁻¹ (подобранный).

$$n_q = 333 \cdot \frac{1450}{60} \cdot \frac{\sqrt{0,048}}{(9,81 \cdot 35,4)^{3/4}} = 22 \text{ с}^{-1}.$$

По расчетным параметрам в нашем случае $f_H = 0,9$.

$$H_B = \frac{35,4}{0,9} = 39,3 \text{ м.}$$

Возможная годовая программа добычи сапропеля, т:

$$\Pi_r = TtQ_{cm}\rho_{cm} \cdot \frac{100 - w_2}{100 - w_y}, \quad (32)$$

где T – количество рабочих дней в году для добычи сапропеля, дни; t – продолжительность смены, ч; $w_y = 60$ – условная влажность, %.

$$\Pi_r = 145 \cdot 8 \cdot 171,6 \cdot 1,024 \cdot \frac{100 - 94}{100 - 60} = 30\,500 \text{ т.}$$

Основное технологическое оборудование при СГДС состоит из нагнетательного и всасывающего насосов, дизельного генератора, буровой установки и монтажной платформы. В качестве тягача может использоваться трактор марки МТЗ.

При выборе генератора необходимо учитывать, что его мощность должна быть достаточной для обеспечения электроэнергией всех механизмов в случае их одновременного включения. В рассмотренном примере мощность генератора составила 60 кВт.

Заключение. Имеющиеся сведения о способах добычи сапропеля, залегающего под торфом, свидетельствуют, что существующие технологии несовершенны и имеют ряд недостатков, снижающих технико-экономические показатели его добычи. Согласно литературным и патентным источникам, при добыче таких полезных ископаемых, как урановые руды, уголь, золотоносные пески, достаточно широко применяется скважинная гидродобыча. Способ базируется на размыве залежи тонкими струями воды высокого давления, засасыванием полученной пульпы и транспортированием ее по трубопроводу в места сушки или переработки. Анализ опубликованных материалов показал, что на данном этапе развития технических возможностей указанный способ наиболее полно отвечает современным тенденциям добычи сапропеля, погребенного под торфом. Учитывая, что технология скважинной гидродобычи данного природного ресурса не имеет аналогов, в первую очередь следует выполнить теоретический расчет с целью установления необходимых параметров сапропелевой гидросмеси и трубопроводного транспорта, а также технических характеристик оборудования.

Расчет выполнен для конкретных условий на примере сапропеля, залегающего под слоем торфа на месторождении Гала-Ковалевское, с учетом его общетехнических свойств.

Установлено, для достижения требуемой консистенции сапропелевой гидросмеси необходимо на 1 т сапропеля влажностью 73,4 % добавить 3,4 т воды. Для принятых условий гидротранспорта пульпы наблюдается ламинарный режим ее течения.

В результате расчета также определены: начальные динамическое и статическое напряжения сдвига гидросмеси, гидравлический уклон, потери напора на трение и местные сопротивления, общий напор, расход. Полученные данные послужили основой для расчета установочных мощностей нагнетательного и всасывающего насосов, а также мощности генератора с учетом возможного включения одновременно всех механизмов добывающей установки.

Установлено, что при односменной работе рекомендуемого оборудования в течение 6 месяцев гидродобычи масса добытого сапропеля составляет 30,5 тыс. т при условной влажности 60 %.

Список использованных источников

1. Косов, В. И. От геэкологии до нанотехнологий. Композитные строительные и топливно-энергетические материалы из органогенных горных пород и отходов / В. И. Косов, А. П. Золотухин. – СПб. : Издательство Политехнического университета, 2010. – 368 с.
2. Богатов, Б. А. Технология и комплексная механизация торфяного производства / Б. А. Богатов, В. А. Никифоров. – Минск : Университетское, 1988. – 463 с.
3. Штин, С. М. Гидромеханизированная добыча торфа и производство торфяной продукции энергетического назначения / С. М. Штин ; под ред. И. М. Ялтанца. – М. : Горная книга, 2012. – 360 с.
4. Справочник ресурсов сапропеля на выработанных торфяных месторождениях. – Минск, 2000. – 102 с.

5. Методические указания по расчету гидравлического транспорта сапропелей. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Главнечерноземводстрой. ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова. (Утв. НТС Главнечерноземводстроя при Минводхозе СССР, протокол № 216 от 20.11.1980). – М., 1981. – 53 с.
6. Александров, В. И. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОК по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта / В. И. Александров, М. А. Васильева. – СПб. : Санкт-Петербургский университет, 2018. – 479 с.
7. Эквивалентный диаметр при расчете трубопровода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ence-pumps.ru/truboprovody/>. – Дата доступа: 01.03.2023.
8. Веллер, М. А. Технология гидроторфа / М. А. Веллер. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1948. – 480 с.
9. Основные принципы подбора насосов. Расчет насосов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ence-pumps.ru/podbor_raschet_nasosov/. – Дата доступа: 08.09.2022.
10. Диаграмма для определения переводных коэффициентов $f_{Q,z}$ и $f_{H,z}$ для вязких сред [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://promhimtech.ru/izgotoviteli/tsentrobezhnyie-i-nasosyi-s-uplotneniem-vala/ksb/>. – Дата доступа: 16.09.2022.
11. Рекомендации по промышленной технологии добычи сапропелей из открытых водоемов для удобрений / Министерство сельского хозяйства СССР. – М. : Колос, 1983. – 49 с.

References

1. Kosov V. I., Zolotuhin A. P. *Ot geoekologii do nanotekhnologij. Kompozitnye stroitel'nye i toplivno-energeticheskie materialy iz organogennyh gornyh porod i othodov* [From geoecology to nanotechnology. Composite building and fuel-energy materials from organogenic rocks and waste]. St. Petersburg, Publ. of the Polytechnic University, 2010, 368 p. (in Russian)
2. Bogatov B. A., Nikiforov V. A. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizaciya torfyanogo proizvodstva* [Technology and complex mechanization of peat production]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1988, 463 p. (in Russian)
3. Shtin S. M. *Gidromekhanizirovannaya dobycha torfa i proizvodstvo torfyanoy produkciyi energeticheskogo naznacheniya* [Hydromechanized extraction of peat and production of peat products for energy purposes]. Moscow, Gornaya kniga, 2012, 360 p. (in Russian)
4. *Spravochnik resursov sapropelya na vyrabotannyh torfyanyh mestorozhdeniyah* [Reference book of sapropel resources in depleted peat deposits]. Minsk, 2000, 102 p. (in Russian)
5. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu gidravlicheskogo transporta sapropelej. Ministerstvo melioracii i vodnogo hozyajstva SSSR. Glavnечерноземводстрой. VNIIGiM im. A. N. Kostyakova (Utv. NTS Glavnечерноземводстроем при Минводхозе СССР, протокол № 216 от 20.11.1980)* [Guidelines for calculating the hydraulic transport of sapropels. Ministry of Melioration and Water Resources of the USSR. Glavnечерноземводстрой. VNIIGiM them. A. N. Kostyakov. (Approved by the NTS of Glavnечерноземводстрой under the Ministry of Water Resources of the USSR, protocol No. 216 of 11.20.80)]. Moscow, 1981, 53 p. (in Russian)
6. Aleksandrov V. I., Vasil'eva M. A. *Gidrotransport sgushchennyh hvostov obogashcheniya zheleznoj rudy na Kachkanarskom GOK po rezul'tatam opytno-promyshlennyyh ispytanij sistemy gidrotransporta* [Hydrotransport of thickened iron ore tailings at Kachkanar GOK based on the results of pilot tests of the hydrotransport system]. St. Petersburg, Saint-Peterburg University, 2018, 479 p. (in Russian)
7. *Ekvivalentnyj diametr pri raschete truboprovoda* (Equivalent diameter when calculating the pipeline) [Electronic resource]. Available at: <https://ence-pumps.ru/truboprovody/> (accessed 1 March 2023). (in Russian)
8. Veller M. A. *Tekhnologiya gidrotorfa* [Hydropeat technology]. Moscow ; Leningrad, Gosenergoizdat, 1948, 480 p. (in Russian)
9. *Osnovnye principy podbora nasosov. Raschet nasosov* (Basic principles for the selection of pumps. Calculation of pumps). Available at: https://ence-pumps.ru/podbor_raschet_nasosov/ (accessed 8 September 2022). (in Russian)
10. *Diagramma dlya opredeleniya perevodnyh koefficientov $f_{Q,z}$ i $f_{H,z}$ dlya vyazkih sred* (Diagram for determining the conversion factors $f_{Q,z}$ and $f_{H,z}$ for viscous media). Available at: <http://promhimtech.ru/izgotoviteli/tsentrobezhnyie-i-nasosyi-s-uplotneniem-vala/ksb/> (accessed 16 September 2022). (in Russian)
11. *Rekomendacii po promyshlennoj tekhnologii dobuchi sapropelej iz otkrytyh vodoemov dlya udobrenij: Ministerstvo sel'skogo hoziaystva. SSSR* [Recommendations on industrial technology for the extraction of sapropels from open reservoirs for fertilizers: Ministry of agriculture. household THE USSR]. Moscow, Kolos Publ., 1983, 49 p. (in Russian)

Информация об авторах

Курзо Борис Валентинович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

Information about authors

Boris V. Kurzo – D. Cs. (Technical), Associate Professor, Head of Lab of peat and sapropel deposits utilization and protection, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

Кунцевич Виктор Болеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Victor B. Kuntsevich – Ph. D. (Technical), Senior researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Гайдукевич Олег Михайлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

Oleg M. Gaidukevich – Ph. D. (Technical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

Макаренко Татьяна Ивановна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

Tatiana I. Makarenko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

Агейчик Инна Валерьевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

Inna V. Ageichik – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

Татков Антон Юрьевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tatkovanton@mail.ru

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

Калилец Людмила Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Lyudmila P. Kalilets – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТОРФЯНОГО КОКСА

А. Э. Томсон, Т. В. Соколова, Т. Я. Царюк, А. С. Марзан,
И. П. Фалиушина, Е. В. Ануфриева, В. С. Пехтерева, М. Г. Калантаров

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены экспериментальные данные по влиянию добавок некоторых неорганических реагентов, оказывающих направленное воздействие на процесс формирования пористой структуры углеродных материалов. Показано, что неорганические модификаторы (хлористый цинк и ортофосфорная кислота) оказывают влияние на процесс термической деструкции торфа, изменяют выход конечных продуктов. Выход полуокиса растет по сравнению с немодифицированным торфом, а жидких и газообразных – снижается, что свидетельствует о сохранении значительной части углерода и кислорода в твердом остатке пиролиза. Данные термического анализа свидетельствуют о более низких температурах протекания структурообразования в коксовом остатке модифицированного торфа. Модификация торфа способствует направленному формированию пористой структуры продуктов коксования торфа. В результате термической деструкции образцов, содержащих 50 и 100 % хлористого цинка при температуре 600 °C происходит интенсивное образование микропор. Образцы полуокисов по сорбционной активности по иоду приближаются к товарным активированным углям. Интенсивное образование микропор при термической деструкции торфа, модифицированного ортофосфорной кислотой в количестве 50 и 100 %, происходит при температуре 450 °C, когда наблюдается потеря органического вещества в виде летучих продуктов.

Ключевые слова: торф; неорганические соединения; пиролиз; углеродные материалы; пористая структура.

Для цитирования. Томсон А. Э., Соколова Т. В., Царюк Т. Я., Марзан А. С., Фалиушина И. П., Ануфриева Е. В., Пехтерева В. С., Калантаров М. Г. Влияние модифицирующих добавок на формирование пористой структуры торфяного кокса // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 198–205.

INFLUENCE OF MODIFYING ADDITIVES ON FORMATION OF THE POROUS STRUCTURE OF PEAT COKE

А. Е. Thomson, Т. В. Sokolova, Т. Я. Tsariuk, А. С. Marzan,
I. P. Faliushyna, A. V. Anufrieva, V. S. Pekhtereva, M. G. Kalantarov

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

Abstract. Experimental data on the influence of the additives of some inorganic reagents, having direct effect on the formation process of the porous structure of carbon materials are given in the article. It is shown that inorganic modifiers (zink chloride and orthophosphoric acid) influence on the process of peat thermal destruction, change the output of final products. Semi-coke output increases in comparison to non-modified peat and liquid and gaseous decrease what evidences the conservation of the significant part of carbon and oxygen in the fossil residues of pyrolysis. Thermal analysis data evidence more low temperatures of the course of structure formation in the coke residue of modified peat. Peat modification contributes to the direct formation of the pore structure of the products of peat coking. Intense creation of micro porous take their place as the result of samples thermal destruction containing 50 and 100 % of zink chloride during 600 °C temperature. Semi-coke samples on sorption activity on iodine are close to commercial activated carbons. Intense creation of micro-porous during peat thermal destruction modified by orthophosphoric acid in the amount of 50 and 100 % take place during 450 °C temperature when organic substance loss in the form of volatile products is observed.

Keywords: peat; inorganic compounds; pyrolysis; carbon materials; porous structure.

For citation. Thomson A. E., Sokolova T. V., Tsariuk T. Ya., Marzan A. S., Faliushina I. P., Anufrieva A. V., Pekhtereva V. S., Kalantarov M. G. Influence of modifying additives on formation of the porous structure of peat coke. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 198–205.

Введение. Одним из приоритетных направлений в области глубокой переработки торфа является получение на его основе активированных углей (АУ). Активированный уголь – высокопористый углеродный адсорбент, который получают из различных углеродсодержащих материалов органического происхождения [1, 2]. В мировой практике получения АУ доля древесного сырья занимает 36,1 %, каменного угля – 27,8, бурого угля – 13,9, торфа – 9,7, скорлупы кокосовых орехов – 9,7, а прочего сырья – 2,8 %.

В настоящее время АУ используют во многих процессах химической технологии – для очистки, разделения и извлечения различных веществ, как жидких, так и газообразных. С каждым годом потребление этого

продукта неуклонно возрастает, поэтому существует необходимость расширения его ассортимента. Актуальной является отработка способа термической деструкции предварительно модифицированного целлюлозосодержащего материала с целью получения АУ специального назначения.

Одним из методов, позволяющих получать пористые углеродные материалы из растительного сырья, является химическая активация, где в качестве модификаторов используются такие реагенты, как KOH, Na₂CO₃, ZnCl₂, AlCl₃, H₃PO₄ и др. [3, 4]. При этом структура и физико-химические свойства модификаторов определяют различные пути трансформации используемого сырья, а затем в зависимости от их содержания и условий обработки приводят к образованию материалов с различной структурой и свойствами.

Химическая активация включает пропитку исходного органического сырья химическими агентами, такими как H₃PO₄, KOH или NaOH, с последующим нагреванием в токе азота в температурном диапазоне 450–900 °C, в зависимости от используемого пропитывающего агента [3, 4]. Карбонизация и активация происходят одновременно, данный метод позволяет получать материалы с большими объемом и размерами микропор. Трансформация такого сырья в углеродных материалах осуществляется под действием:

1) кислотно-основных катализаторов типа ZnCl₂, AlCl₃, K₂S, H₃PO₄;

2) окислительно-восстановительных катализаторов (карбонатов или оксидов преимущественно щелочных металлов), способных восстанавливаться углеродом и окисляться кислородом (катализаторы этой группы обычно используют в присутствии газа-окислителя). Обе группы катализаторов активируют трансформации алифатических соединений, почти не затрагивая арил-арильные С–С-связи, что приводит к селективному удалению кислорода, водорода и других гетероатомов с одновременной карбонизацией и активацией при температурах обычно ниже 700 °C.

Практическое применение среди хлоридов металлов чаще находит ZnCl₂ [5]. При получении АУ из торфа используются также хлориды металлов, такие как AlCl₃, MnCl₂, SnCl₂. Типичными в действии на торф вышеотмеченных хлоридов металлов являются смещение процесса его термического разложения в область более низких температур, увеличение выхода твердого остатка, уменьшение выхода смолистых веществ, более интенсивное протекание реакций дегидратации [6, 7].

В качестве активатора при получении АУ используют и ортофосфорную кислоту [8]. Добавка H₃PO₄ к торфу интенсифицирует, подобно хлоридам, реакции дегидратации. Структурирование углеродсодержащего твердого остатка в присутствии H₃PO₄ происходит при температуре 300–900 °C. Такой остаток представляет собой пористый углеродный материал с развитой микропористой структурой, который отличается высокой механической прочностью. Установлено, что для получения адсорбентов карбонизацией торфа с H₃PO₄ предпочтительно выбирать торф с высоким содержанием веществ углеводного характера.

Основная часть. Объект исследования – пущево-сфагновый торф невысокой степени разложения ($R = 25\%$) торфяного месторождения «Радемье» РУП «Зеленоборское» Смолевичского района Минской области. Получены композиции на основе торфа и неорганических модификаторов – ортофосфорной кислоты и хлористого цинка в концентрации 10, 50 и 100 % в пересчете на органическое вещество торфа.

Термическую деструкцию образцов исходного и модифицированного торфа проводили до температур 300, 450, 600, 750 °C с выдержкой при этих температурах в течение 10 мин. Выход полукокса и жидких продуктов определяли весовым методом, а газа (в процентах) – по разности. Параметры пористой структуры оценивали по адсорбционной активности по иоду, указывающей на развитие системы микропор – титрованием по ГОСТ 6217-74. Суммарный объем пор по воде (размер пор 0,5–10⁴ нм) оценивали по ГОСТ 17219-71.

Полученные образцы торфа с неорганическими модификаторами исследовали методом термического анализа. Термогравиметрический анализ композиций торфа с модифицирующими добавками проводили на синхронном термоанализаторе STA 2500 фирмы NETZSCH, работающем под управлением программного пакета NETZSCH Proteus Termal Analysis. Условия проведения исследований: термопара – тип S; тигель – Pt; эталон – Al₂O₃; масса образца 17–20 мг; скорость нагрева – 10 К/мин, диапазон температур – 30–1000 °C; газ-носитель, защитный газ – азот; расход газа-носителя – 20 мл/мин, расход защитного газа – 30 мл/мин. Каждый образец композиции подвергали термическому анализу в трехкратной повторности, а расчет дифференциальных кривых и их последующую обработку проводили по средней кривой потери массы.

Изучено влияние количества введенного модификатора и температуры термолиза на выход углеродистого остатка (полукокса), жидких и газообразных продуктов. На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные данные, анализ которых свидетельствует об увеличении выхода полукокса в интервале температур 300–600 °C при модификации торфа хлористым цинком и ортофосфорной кислотой по сравнению с исходным торфом. Возрастание содержания модифицирующей добавки при одинаковых температурах термолиза также способствует увеличению выхода полукокса. Иная картина наблюдается при температуре термообработки 750 °C. При концентрации хлористого цинка 10 и 50 % выход полукокса несколько увеличивается, дальнейшее же повышение содержания модификатора уменьшает выход полукокса.

Выход жидких продуктов при термолизе торфа, модифицированного хлористым цинком, в интервале температур 300–450 °C изменяется незначительно, а содержание модифицирующей добавки не оказывает заметного влияния на этот параметр (см. рис. 1, б). Однако при температуре термолиза 600 °C происходит существенное, примерно до 17–56 %, снижение выхода жидких продуктов по сравнению с термолизом немодифицированного торфа. Повышение температуры термолиза до 750 °C практически не влияет на выход жидких продуктов при термической деструкции образцов, содержащих 10 и 50 % хлористого цинка, но пиролиз образца, содержащего 100 % этого модификатора, приводит к увеличению выхода жидких продуктов до 45 % от органической массы образца.

При термолизе в интервале температур 300–450 °C введение хлористого цинка снижает выход газа по сравнению с немодифицированным образцом. В интервале температур 450–750 °C наблюдается противоположная картина: выход газа увеличивается и при температуре 750 °C для всех образцов наблюдается максимум газовыделения. Для немодифицированного торфа максимум газовыделения составляет 26 % от органической массы образца, с добавкой 10 % модификатора – 32, с добавкой 50 % модификатора – 33, для образца, содержащего 100 % модификатора – 37 %.

При модификации торфа ортофосфорной кислотой (рис. 2, а) зависимости выхода полукокса от температуры термической деструкции и содержания модификатора аналогичны тем, что установлены для композиций с хлористым цинком (см. рис. 1, а).

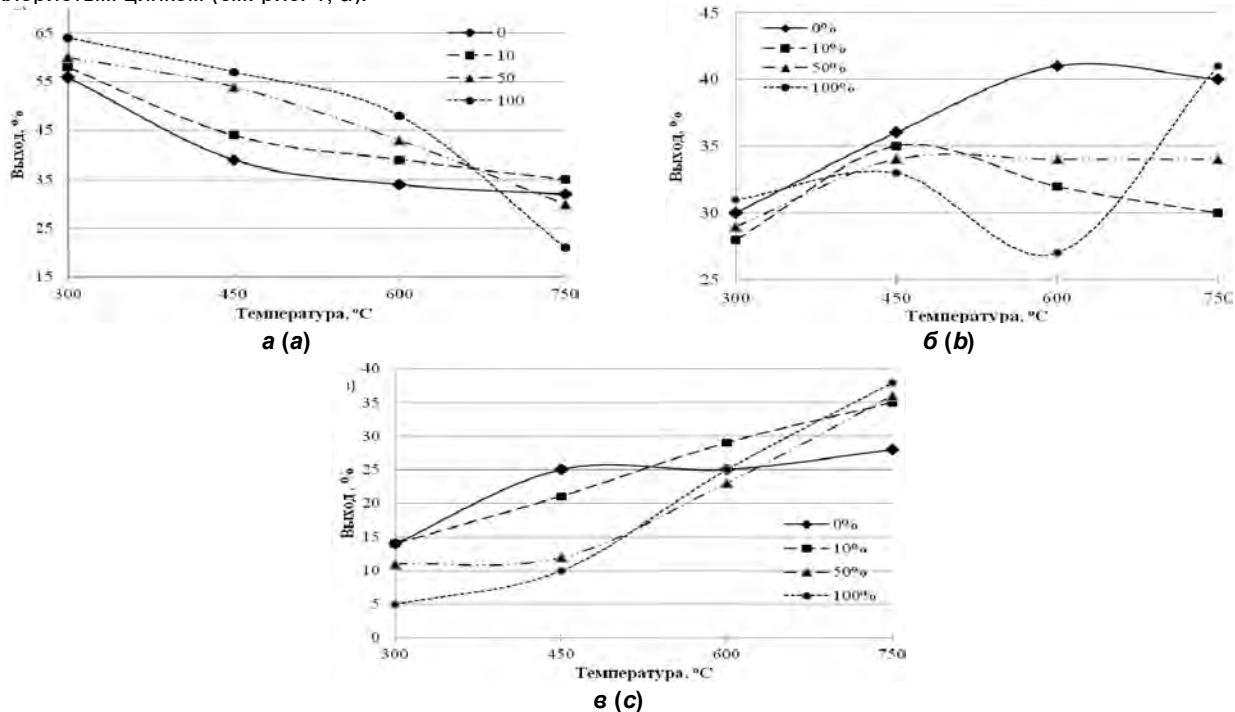


Рис. 1. Влияние содержания хлористого цинка и температуры пиролиза на выход продуктов при термической деструкции композитов на основе торфа: а – полукокс; б – жидкие продукты; в – газ

Fig. 1. Influence of zinc chloride content and pyrolysis temperature on product yield during thermal destruction of peat-based composites: a – semi-coke; b – liquid products; c – gas

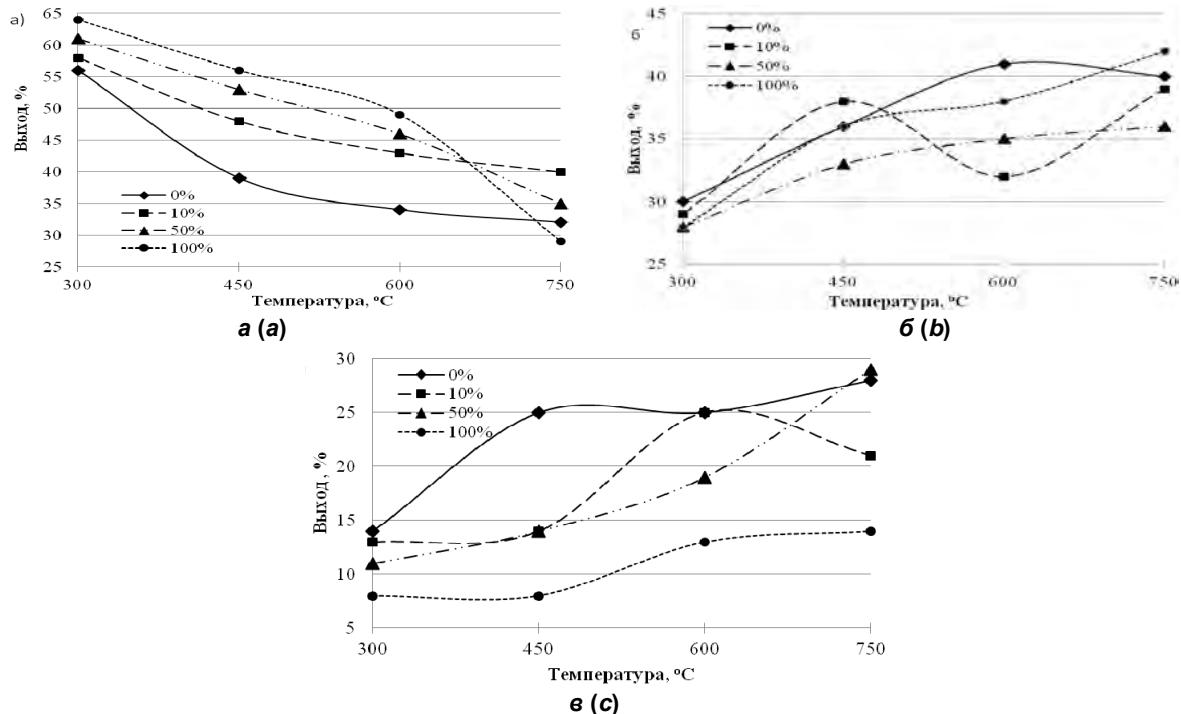


Рис. 2. Влияние содержания ортофосфорной кислоты и температуры пиролиза на выход продуктов при термической деструкции композитов на основе торфа: а – полукокс; б – жидкие продукты; в – газ

Fig. 2. Influence of orthophosphoric acid content and pyrolysis temperature on product yield during thermal destruction of peat-based composites: a – semi-coke; b – liquid products; c – gas

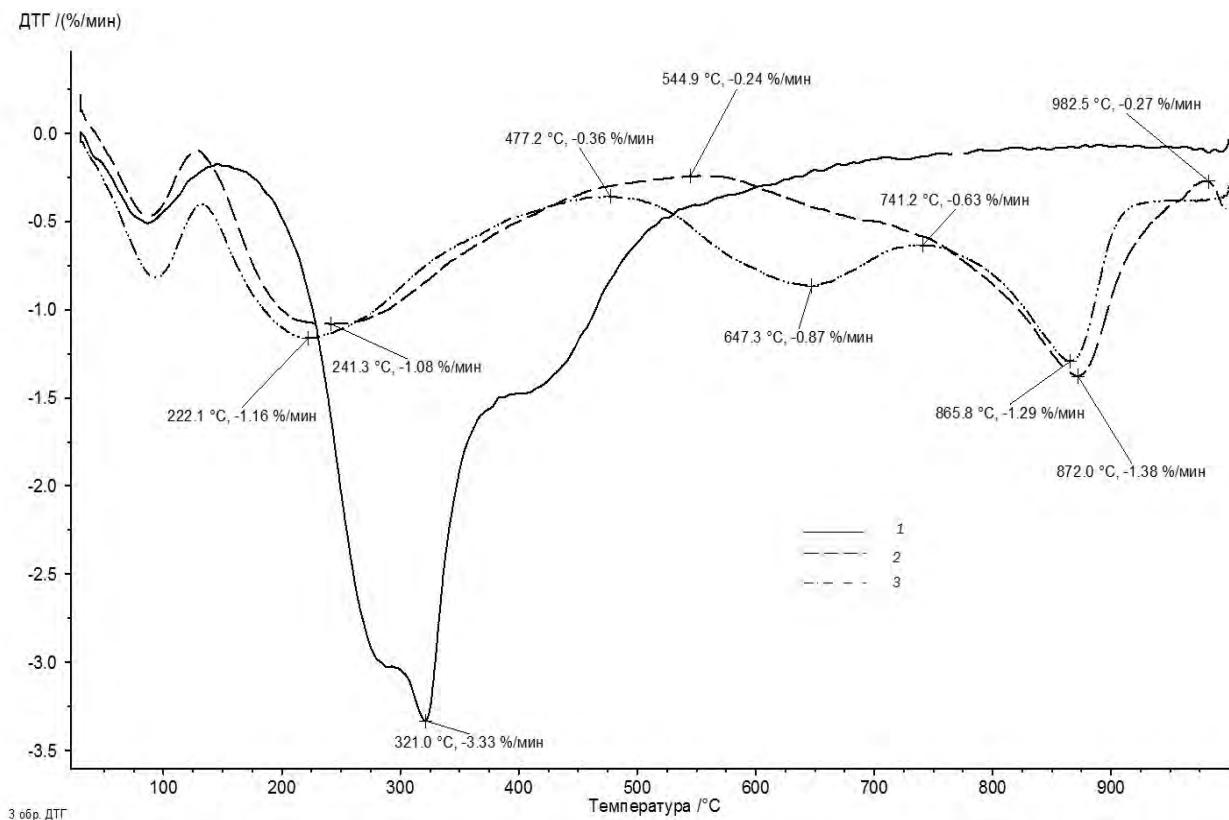


Рис. 3. Кривые ДТГ образцов исходного и модифицированного ортофосфорной кислотой торфа:
1 – торф; 2 – торф + 50 % модификатора; 3 – торф + 100 % модификатора

Fig. 3. DTG curves for samples of the original and peat modified with orthophosphoric acid:
1 – peat; 2 – peat + 50 % modifier; 3 – peat + 100 % modifier

Выход жидких продуктов в интервале температур 450–600 °C, а газообразных продуктов в интервале 300–600 °C снижается по сравнению с немодифицированным торфом, что свидетельствует о сохранении значительной части углерода и кислорода в твердом остатке пиролиза.

На рис. 3 приведены дифференциальные кривые потери массы образцами исходного и модифицированного ортофосфорной кислотой в количестве 50 и 100 % торфа.

Картина процесса термической деструкции исходного торфа (см. рис. 3) достаточно характерна для термолиза большинства образцов торфа вне зависимости от их типовой и видовой принадлежности. В температурном интервале 110–160 °C выделяется гигроскопическая и пирогенетическая вода. При температурах 275–325 °C термическое разложение сопровождается образованием значительного количества газообразных и жидких продуктов термолиза и процесс протекает с выделением тепла. В интервале температур 475–500 °C прекращается выделение жидких продуктов пиролиза, а при температуре выше 600 °C скорость деструктивных процессов существенно снижается. В температурном интервале 600–1000 °C процессы термического распада протекают без заметных тепловых эффектов.

В таблице приведены результаты расчета потери массы исходными и модифицированными ортофосфорной кислотой образцами торфа на основании обработки интегральных кривых потери массы (ТГ). Известно [9], что деструкция фосфорилированной целлюлозы в низкотемпературной области сопровождается более высокой потерей массы по механизму через образование сложных эфиров, хотя устойчивость фосфорнокислотных эфиров целлюлозы сравнительно высока вплоть до температур термической обработки 140–150 °C. Как следует из данных ТГ, основные процессы потери массы образцами фосфорилированного торфа протекают в области более низких температур с максимумами потери массы при 220–240 °C. При этом в области температур до 200 °C потери массы образцом исходного торфа не превышают 5 %, тогда как с добавками ортофосфорной кислоты эти значения увеличиваются от 6 до 10 %, указывая на более раннее протекание процессов дегидратации органического вещества торфа, что подтверждается наличием выраженного эндотермического эффекта на кривых дифференциального термического анализа в области температур около 180 °C (рис. 4).

**Потеря массы образцами торфа, модифицированными ортофосфорной кислотой,
в различных температурных диапазонах, %**

Weight loss of peat samples modified with orthophosphoric acid in different temperature ranges, %

Содержание кислоты на органическое вещество торфа, %	Температурный диапазон, °C					Остаточная масса, %
	до 200	200–400	400–600	600–800	800–1000	
0	4,93	41,45	15,52	3,47	1,67	32,96
50	6,11	17,59	6,21	10,52	16,26	43,30
100	10,39	17,21	9,54	14,94	14,39	33,52

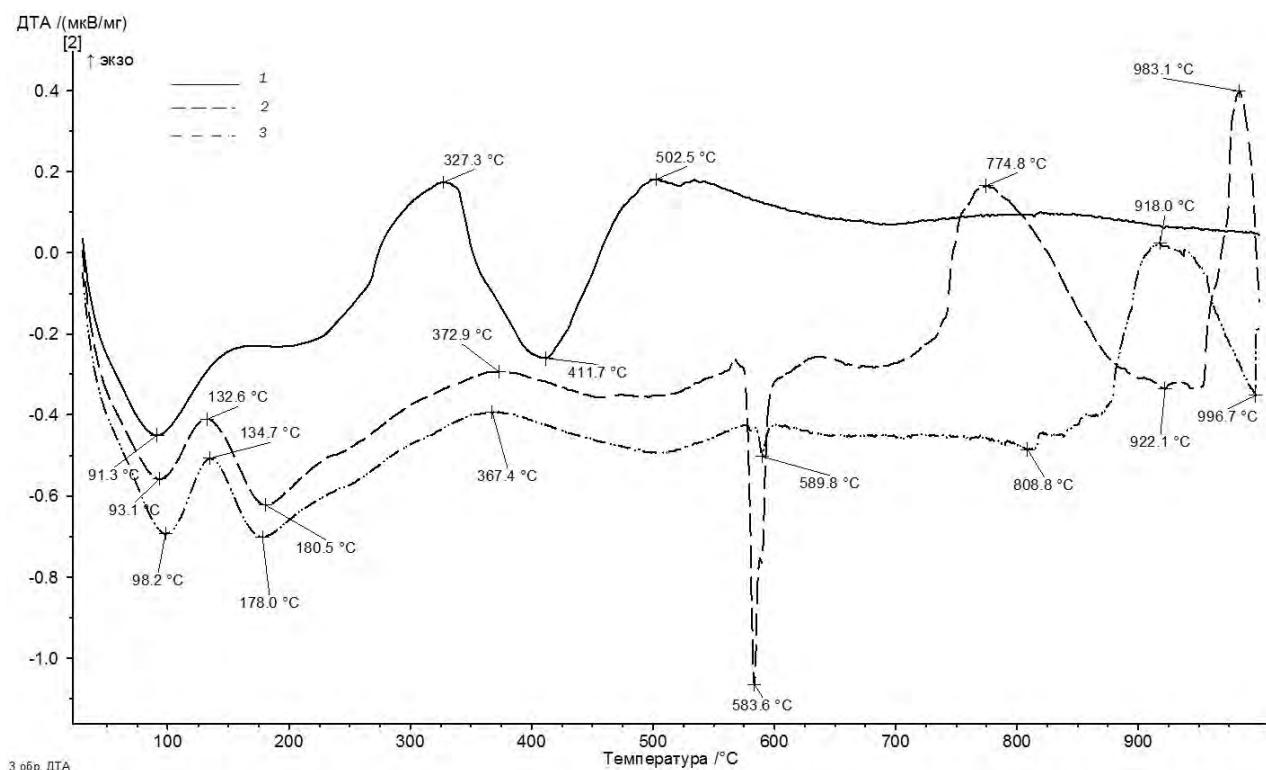


Рис. 4. Кривые ДТА образцов исходного и модифицированного ортофосфорной кислотой торфа:
1 – торф; 2 – торф + 50 % модификатора; 3 – торф + 100 % модификатора

Fig. 4. DTA curves for samples of the original and peat modified with phosphoric acid:
1 – peat; 2 – peat + 50 % modifier; 3 – peat + 100 % modifier

Как следует из данных таблицы, основные потери массы образцами исходного торфа (примерно 57 %) наблюдаются в области температур 250–600 °C. В указанном интервале температур суммарная потеря массы образцами фосфорилированного торфа составляет примерно 24–28 %. Причем анализ кривых ДТА дает основание утверждать, что отсутствие заметных тепловых эффектов в указанной температурной области не позволяет сделать вывод о каталитическом влиянии добавок ортофосфорной кислоты на процесс распада органического вещества торфа. Более того, достаточно плавный ход кривых ДТГ и отсутствие тепловых эффектов на кривых ДТА свидетельствуют о более низких температурах протекания структурообразования в коксовом остатке модифицированного торфа. Данные термического анализа согласуются с результатами балансовых опытов по выходу основных продуктов термолиза при изучаемых температурах. В отличие от немодифицированного торфа на кривых ДТГ образцов торфа, содержащего добавки ортофосфорной кислоты в количестве 50 и 100 %, наблюдается заметный рост скорости термического разложения в области температур 800–940 °C. Рост скорости разложения образцов модифицированного торфа сопровождается протеканием экзотермических процессов при температурах 775 °C и 920 °C. Эти результаты подтверждаются данными таблицы, из которых следует, что в области температур 600–1000 °C завершение процесса термического распада исходного торфа фиксируется по данным ТГ потерей массы примерно 5 % и в указанном температурном интервале распад образцов фосфорилированного торфа сопровождается ориентировочно потерей массы 27–29 %. По данным [1], протекание подобного рода процессов может быть связано с реакциями термодеструкции фосфорсодержащих фрагментов углеродной матрицы.

Для оценки влияния содержания модификатора и температуры на пористую структуру подвергнутых термической деструкции модифицированных образцов торфа были изучены сорбционные свойства полукоксов, полученных в результате пиролиза при различных температурах (рис. 5 и 6).

Анализ данных, представленных на рис. 5, а, показывает, что в результате термической деструкции образцов торфа при повышении температуры термолиза происходит образование микропор. Наиболее интенсивно этот процесс протекает у образцов с содержанием хлористого цинка 50 и 100 % при температуре 600 °C. Упомянутые выше образцы полукоксов по сорбционной активности по иоду приближаются к товарным АУ. Также при температуре 600 °C происходит образование мезопор при концентрации модификатора 100 %. Их количество увеличивается в 5,4 раза по сравнению с полукоксом немодифицированного торфа. Дальнейшее повышение температуры до 750 °C приводит к падению количества микро- и мезопор.

Суммарный объем пор по воде образцов модифицированного хлористым цинком торфа также увеличивается с повышением температуры термической деструкции (см. рис. 5, б), а максимальный объем пор образуется при термолизе образца торфа, содержащего 50 % хлористого цинка, при температуре 600 °C.

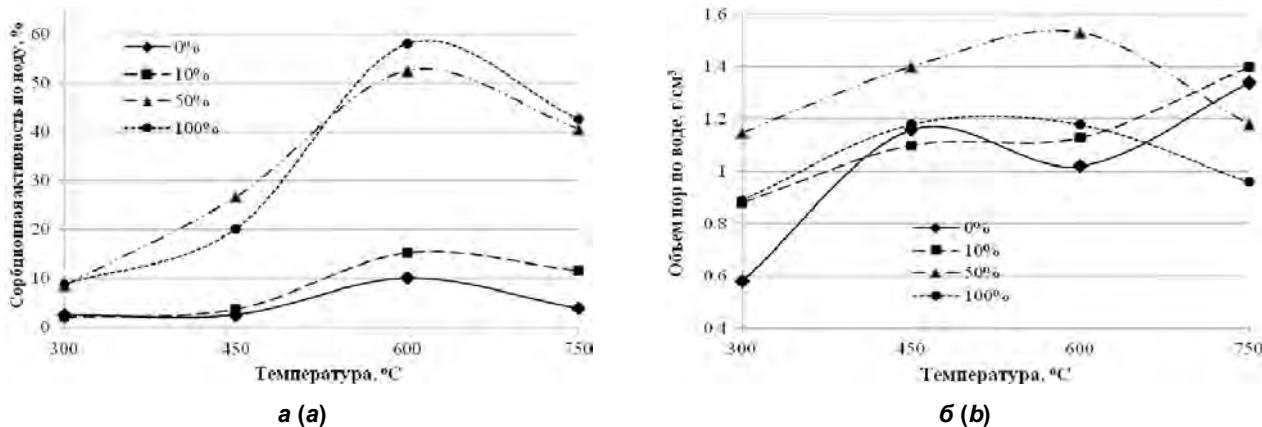


Рис. 5. Зависимость сорбционной активности полукокса (а) и суммарного объема пор по воде (б) от содержания хлористого цинка и температуры термической деструкции композитов на основе торфа

Fig. 5. Dependence of the sorption activity of semi-coke (a) and the total pore volume in water (b) on the content of zinc chloride and the temperature of thermal destruction of peat-based composites

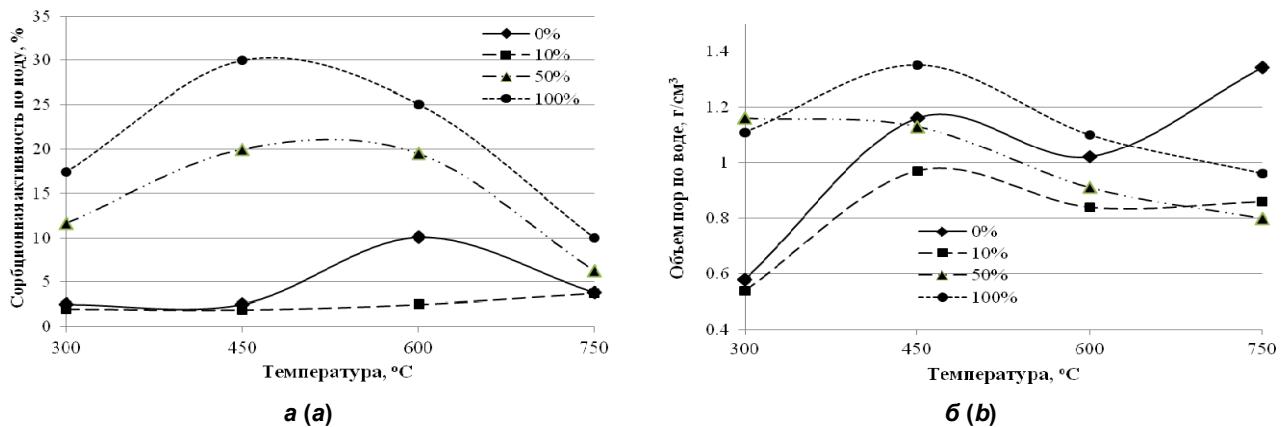


Рис. 6. Зависимость сорбционной активности полукокса (а) и суммарного объема пор по воде (б) от содержания ортофосфорной кислоты и температуры термической деструкции композитов на основе торфа

Fig. 6. Dependence of the sorption activity of semi-coke (a) and the total pore volume in water (b) on the content of orthophosphoric acid and the temperature of thermal destruction of composites based on peat

Особенности термического разложения образцов торфа, модифицированных ортофосфорной кислотой, коррелируют с данными по формированию пористой структуры термообработанных образцов.

Из анализа данных, представленных на рис. 6, а, следует, что наиболее интенсивное образование микропор при термической деструкции торфа, модифицированного ортофосфорной кислотой в количестве 50 и 100 % на органическое вещество торфа, происходит в интервале температур 300–600 °C с максимумом при 450 °C, т. е. ярко выраженные процессы формирования пористой структуры углеродного каркаса модифицированного ортофосфорной кислотой торфа происходят в области температур, связанных с наиболее интенсивно протекающими

низкотемпературными процессами распада органического вещества торфа, в процессе термической деструкции препятствующего образованию плотного коксового остатка, что обусловлено катализитическим влиянием модификатора. Как отмечается в работе [1], при изучении процессов синтеза пористых углеродных материалов на основе микрокристаллической целлюлозы, модифицированной ортофосфорной кислотой, ухудшение параметров пористой структуры карбонизованных материалов в области температур 500–600 °C может быть связано со «схлопыванием» пор за счет полифосфатной сшивки. Аналогичные результаты получены нами в ходе проведенной экспериментальной работы. Дальнейшее повышение температуры до 750 °C приводит к снижению количества микропор.

Суммарный объем пор по воде полуоксов образцов торфа, модифицированного ортофосфорной кислотой, как и в случае использования хлористого цинка, увеличивается с повышением температуры термической деструкции (рис. 6, б), однако максимальный объем пор образуется, в отличие от последнего, при температуре 450 °C, дальнейший рост температуры к образованию новых пор не приводит.

Заключение. Установлено, что с увеличением количества модификатора в интервале температур 300–600 °C выход полуокса по сравнению с немодифицированным торфом растет, а жидких и газообразных продуктов снижается, что свидетельствует о сохранении значительной части углерода и кислорода в твердом остатке пиролиза. В результате пиролиза торфа, содержащего 50 и 100 % хлористого цинка, до температуры 600 °C происходит интенсивное образование микропор.

Наиболее интенсивное образование микропор при термической деструкции торфа, модифицированного ортофосфорной кислотой в количестве 50 и 100 %, происходит при температуре 450 °C, когда наблюдается потеря органического вещества в виде летучих продуктов. Суммарный объем пор по воде полуоксов увеличивается с повышением температуры термической деструкции, достигая максимального значения при температуре 450 °C.

Список использованных источников

- Формирование пористой структуры углеродных материалов при карбонизации микрокристаллической целлюлозы, модифицированной фосфорной кислотой и гидроксидом калия / С. И. Цыганова [и др.] // Химия растительного сырья. – 2010. – № 1. – С. 57–62.
- Морфология продуктов карбонизации древесины березы, модифицированной KOH, ZnCl₂ и H₃PO₄ / С. И. Цыганова [и др.] // Химия растительного сырья. – 2011. – № 2. – С. 91–95.
- Кропотов, В. И. Развивать производство активных углей в лесохимической промышленности / В. И. Кропотов // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1976. – № 1. – С. 56–64.
- Галкин, В. А. Исследования углей различных пород древесины как сырья для получения активных углей / В. А. Галкин, В. Н. Голубев, Ю. В. Андреев // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1970. – № 4. – С. 18–19.
- Термическая деструкция природных полимеров в присутствии хлорида цинка / З. К. Лукьянова [и др.] // Химия твердого топлива. – 1979. – № 4. – С. 48–53.
- Характеристика продуктов карбонизации торфа в присутствии хлорида алюминия / М. И. Баранчикова [и др.] // Химия твердого топлива. – 1984. – № 3. – С. 66–72.
- Выбор эффективных активаторов и наиболее пригодного сырья при получении активных углей из торфа / А. М. Кунин [и др.] // Торфяная промышленность. – 1983. – № 10. – С. 24–26.
- Исследование пористой структуры продуктов карбонизации торфа в присутствии ортофосфорной кислот / О. И. Мазина [и др.] // Химия твердого топлива. – 1980. – № 4. – С. 64–67.
- Ермоленко, И. Н. Элементосодержащие угольные волокнистые материалы / И. Н. Ермоленко, И. И. Люблинер, Н. В. Гулько. – Минск : Наука и техника, 1982. – 272 с.

References

- Tsyganova S. I., Korolkova I. V., Chesnokov N. V., Kuznetsov B. N. *Formirovanie poristoi struktury uglerodnykh materialov pri karbonizatsii mikrokristallicheskoi tsellyulozy, modifitsirovannoi fosfornoi kislotoi i gidroksidom kaliya* [Formation of a porous structure of carbon materials during the carbonization of microcrystalline cellulose modified with phosphoric acid and potassium hydroxide]. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*, 2010, no. 1, pp. 57–62. (in Russian)
- Tsyganova S. I., Kargin V. F., Korolkova I. V., Chesnokov N. V. *Morfologiya produktov karbonizatsii drevesiny berzey, modifitsirovannoi KON, ZnCl₂ i H₃PO₄* [Morphology of carbonization products of birch wood modified with KOH, ZnCl₂, and H₃PO₄]. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*, 2011, no. 2, pp. 91–95. (in Russian)
- Kropotov V. I. *Razvivat proizvodstvo aktivnykh uglei v lesokhimicheskoi promyshlennosti* [To develop the production of active carbons in the wood chemical industry]. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'*, 1976, no. 1, pp. 56–64. (in Russian)
- Galkin V. A., Golubev V. N., Andreev Yu. V. *Issledovaniya uglei razlichnykh porod drevesiny kak syrya dlya polucheniya aktivnykh uglei* [Studies of coals of various wood species as raw materials for the production of active carbons]. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'*, 1970, no. 4, pp. 18–19. (in Russian)

5. Lukyanova Z. K., Mazina O. I., Rakovskii V. E. *Termicheskaya destruktsiya prirodnnykh polimerov v prisutstvii khlorida tsinka* [Thermal destruction of natural polymers in the presence of zinc chloride]. *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 1979, no. 4, pp. 48–53. (in Russian)
6. Baranchikova M. I., Mazina O. I., Zhukov V. K., Levchenko T. S. *Kharakteristika produktov karbonizatsii torfa v prisutstvii khlorida aljuminija* [Characterization of peat carbonization products in the presence of aluminum chloride]. *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 1984, no. 3, pp. 66–72. (in Russian)
7. Kunin A. M., Ogurtsov A. V., Pavlova L. N. *Vybor effektivnykh aktivatorov i naibolee prigodnogo syrya pri poluchenii aktivnykh uglei iz torfa* [The choice of effective activators and the most suitable raw materials for the production of activated carbons from peat]. *Torfanaya promyshlennost'*, 1983, no. 10, pp. 24–26. (in Russian)
8. Mazina O. I., Makeeva G. P., Drozhalina N. D. *Issledovanie poristoi struktury produktov karbonizatsii torfa v prisutstvii ortofosfornoj kisloty* [Study of the porous structure of peat carbonization products in the presence of phosphoric acid]. *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 1980, no. 4, pp. 64–67. (in Russian)
9. Ermolenko I. N., Lyubliner I. I., Gulko N. V. *Elementosoderzhashchie ugolnye voloknistye materialy* [Elemental coal fibre materials]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1982, 272 p. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Соколова Тамара Владимира – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Фалиушина Ирина Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Ануфриева Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Пехтереева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@jandex.ru

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

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. Tsariuk – 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

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

Iryna P. Faliushyna – 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

Elena 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

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

Michail 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

СОСТАВ И АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ СПИРТОВЫХ И ЭФИРНЫХ ЭКСТРАКТОВ СФАГНОВОГО ТОРФА И СФАГНОВОГО МХА

Н. А. Жмакова¹, Н. Л. Макарова¹, Т. Ф. Овчинникова¹,
Е. А. Семенчукова², А. А. Муратова²

¹Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь;

²Институт микробиологии НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Из сфагновых мхов *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum fuscum*, *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum apiculatum*, а также магелланикум- и фускум-торфа экстракцией этиловым спиртом и диэтиловым эфиром выделены образцы, обогащенные фенольными соединениями. Установлено, что массовая доля свободных фенольных соединений в спиртовых и эфирных экстрактах находится в пределах 23,46–33,70 мг/мл. При этом в их составе содержится 5,15–5,72 % катехинов, 4,30–7,21 % фенолкарбоновых кислот, 25,31–36,49 % флавонолов. Установлена биоцидная активность фенолсодержащих экстрактов в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов – *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* Н. П. *Pseudomonas corrugata* 3', *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000, *Erwinia amylovora* E-2 (БИМ В-641) *Pectobacterium carotovorum* 25.1, *Fusarium oxysporum* 381 *Alternaria* sp. Г-4. Наиболее высокую antimикробную активность проявил спиртовой экстракт мха фускум 20%-м этианолом при температуре 100 °C, который подавлял развитие всех фитопатогенов за исключением возбудителя альтернариоза. Спиртовой экстракт мха фускум 70%-м этианолом проявлял активность только в отношении *F. oxysporum* 381 и *C. michiganensis* Н. П., а фускум-торфа – бактерий *C. michiganensis* Н. П. и *P. syringae* pv. *tomato* DC3000. Экстракти диэтиловым эфиром сфагновых мхов всех видов подавляли рост *C. michiganensis* Н. П. и *P. corrugata* 3'. Для экстрактов торфа фускум диэтиловым эфиром и диэтиловым эфиром после предварительной экстракции петролейным эфиром зафиксирована активность в отношении *P. corrugata* 3', *Pec. carotovorum* 25.1 и *F. oxysporum* 381. Против патогена *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 проявили активность эфирные экстракты мхов ангустифолиум, апикулятум и фускум.

Ключевые слова: сфагновый торф; сфагновый мох; фенольные соединения; катехины; флавонолы; фенолкарбоновые кислоты; antimикробная активность.

Для цитирования. Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Овчинникова Т. Ф., Семенчукова Е. А., Муратова А. А. Состав и antimикробная активность спиртовых и эфирных экстрактов сфагнового торфа и сфагнового мха // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 206–216.

COMPOSITION AND ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF ALCOHOLIC AND ETHER EXTRACTS OF SPHAGNUM PEAT AND SPHAGNUM MOSS

N. A. Zhmakova¹, N. L. Makarova¹, T. F. Ovchinnikova¹,
E. A. Semenchukova², A. A. Muratova²

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

²Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. From the sphagnum mosses *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum fuscum*, *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum apiculatum*, and magellanicum and fuscum peat, samples enriched with phenolic compounds were isolated by extraction with ethyl alcohol and diethyl ether. It was found that the mass fraction of free phenolic compounds in alcohol and ether extracts was in the range 23.46–33.70 mg/ml. Their composition includes 5,15–5,72 % catechins, 4,30–7,21 % phenolcarboxylic acids, 25,31–36,49 % flavonols. The biocidal activity of phenol-containing extracts against a number of phytopathogenic microorganisms – *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* Н. П. *Pseudomonas corrugata* 3', *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000, *Erwinia amylovora* E-2 (БИМ В-641) *Pectobacterium carotovorum* 25.1, *Fusarium oxysporum* 381 *Alternaria* sp. Г-4. The highest antimicrobial activity was demonstrated by an alcohol extract of Fusum moss with 20 % ethanol at 100 °C, which suppressed the development of all phytopathogens except for Alternaria pathogen. Alcoholic extract of fuscum moss with 70 % ethanol showed activity only against *F. oxysporum* 381 and *C. michiganensis* Н. П., and fuscum peat – bacteria *C. michiganensis* Н. П., *P. syringae* pv. *tomato* DC3000. Diethyl ether extracts of sphagnum mosses of all species suppressed the growth of *C. michiganensis* Н. П. and *P. corrugata* 3'. Activity against

P. corrugata 3', *Pec. carotovorum* 25.1, and *F. oxysporum* 381 was recorded for fuscum peat extracts with diethyl ether and diethyl ether after preextraction with petroleum ether. Essential extracts of mosses *Angustifolium*, *Apiculatum* and *Fuscum* showed activity against the pathogen *P. syringae* pv. *tomato* DC3000.

Keywords: sphagnum peat; sphagnum moss; phenolic compounds; catechins; flavonols; phenolcarboxylic acids; antimicrobial activity.

For citation. Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Semenchukova E. A., Muratova A. A. Composition and antimicrobial activity of alcoholic and ether extracts of sphagnum peat and sphagnum moss. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 206–216.

Введение. В настоящее время все более актуальным становится использование антимикробных препаратов растительного происхождения, несмотря на наличие большого ассортимента антибактериальных и противогрибковых средств, поскольку многие из синтетических средств защиты растений обладают побочными эффектами, а полученные на основе природных соединений биоцидные препараты имеют низкую токсичность и отличаются от аналогов мягким и комплексным действием. Исследования по выделению из растительного сырья природных соединений и их химической модификации с целью создания препаратов различной функциональной направленности, в том числе бактерицидного, фунгицидного, противовирусного действия, стали основой нового научного направления биоорганической химии. Наибольшее внимание привлекают природные соединения, о биологической активности которых имеются достоверные научные сведения.

Экологически безопасные антимикробные препараты могут быть получены на основе сфагнового торфа и его растений-торфообразователей – сфагновых мхов, которые являются богатым источником биологически активных веществ различной химической природы, таких как: полисахарида разнообразного строения, в том числе пектины или полиурониды; органические кислоты; природные фенольные соединения, включающие фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды, альдегиды, кумарины, флавоны; терпеновые и терпеноидные соединения и др.

В процессе торфообразования болотная растительность подвергается существенному микробиологическому воздействию, в результате чего отдельные, наименее устойчивые, органические компоненты растительного происхождения разрушаются, а другие, более устойчивые вещества различных химических классов, могут не только сохраняться, но и относительно накапливаться. Кроме того, в процессе торфообразования образуются вторичные продукты микробного и химического синтеза, в том числе гуминовые вещества. Эти сложные природные соединения не синтезируются в живых организмах, но в значительных количествах образуются в процессе разложения отмерших болотных растений в залежи. Таким образом, сфагновые мхи и сфагновый торф можно рассматривать как концентрированный источник соединений отдельных химических классов, многие из которых обладают выраженной антимикробной активностью [1–6].

Среди комплекса биологически активных веществ сфагновых мхов и торфа малой степени разложения наибольший интерес в этом плане представляют фенольные соединения, поскольку биоцидные свойства во многом обусловлены наличием в их химическом составе веществ этого класса [1–9].

Фенольные соединения выполняют различные функции в процессе жизнедеятельности растений: участвуют в целом ряде защитных механизмов, формировании естественных барьеров на пути инфекции и активном антибиотическом воздействии на возбудителей.

Так, многочисленными исследованиями показано, что различные фенольные соединения, выполняя защитные функции, проявляют антиоксидантную, антибактериальную, фунгицидную, антивирусную и инсектицидную активность [4–10].

Органическое вещество сфагнового торфа и его растений-торфообразователей представлено целым комплексом биологически активных фенольных соединений. Они обеспечивают высокую сохранность отмерших растений в условиях болот, поскольку совместно с органическими кислотами создают неблагоприятные условия для развития микроорганизмов в болотной среде.

Большой интерес среди них представляют фенолкарбоновые кислоты. Сфагновые мхи торфяных месторождений содержат до 70–120 мг% фенолкарбоновых кислот в сухой массе. Их содержание в сфагновом торфе существенно ниже. При этом, чем выше уровень гумификации торфа, тем меньше фенолкарбоновых кислот сохраняется в его составе. Так, в магелланум-торфе со степенью разложения (*R*) 5–10 % их содержание составляет 59,7 мг%, в торфе с *R* = 15 % их уровень снижается до 37,6 мг%, а в наиболее разложившемся магелланум-торфе – до 12,4 мг% [1, 2]. Существенное уменьшение содержания этих соединений с ростом степени разложения торфа можно объяснить их активным участием в процессе образования гуминовых веществ, также имеющих фенольную природу.

В составе мха и торфа содержатся как оксибензойные, так и оксикоричные фенольные кислоты (п- и м-оксибензойные, кумаровая, синаповая, ванилиновая, галловая, салициловая, хлорогеновая, сиреневая и др.), а также их эфиры [11].

Не менее важна группа биологически активных веществ, относящихся к крупнейшему классу природных полифенолов, – флавоноиды. С химической точки зрения они представляют собой гидроксипроизводные флавона (флавоноиды), 2,3-дигидрофлавона (флаваноны), изофлавона (изофлавоноиды), 4-фенилкумарины (неофлавоноиды).

Флавоноиды присутствуют в значительных количествах в сфагновых мхах и торфе [11], причем эти соединения накапливаются в торфе и уровень их содержания увеличивается по мере возрастания степени разложения. Так, в магелланум-торфе с $R = 25\%$ их количество составляет более 450 мг% на сухое вещество, что сопоставимо с содержанием в некоторых лекарственных растениях. Следовательно, флавоноиды проявляют значительную устойчивость в торфообразовательном процессе, не только сохраняясь, но и относительно накапливаясь в торфе, что не всегда характерно для других фенольных соединений. Флавоноиды обладают широким спектром биологического действия, который многие исследователи связывают с их высокой антиоксидантной активностью.

В сфагновых мхах и торфе в значительных количествах присутствуют катехины – фенольные соединения, относящиеся к особой группе флавоноидов, обладающих выраженным биологическим действием. Их содержание в сухом веществе мхов составляет 78–120 мг%. В торфяной залежи массовая доля катехинов несколько возрастает. Однако это увеличение относительное и, скорее всего, связано с потерями торфом других лабильных компонентов. Преобладающая часть катехинов в торфе представлена катехингаллатом [1, 2, 11].

Среди биологических свойств флавоноидов привлекают внимание их антимикробные свойства. Так, выявлена бактерицидная активность кверцетина, мирицетина, галлокатехина, эпигаллокатехина, противовирусная активность биофлавоноида дигидрокверцетина и др. [3, 11–15].

Таким образом, сфагновые мхи и сфагновый торф можно рассматривать как потенциальное сырье для получения антибактериальных, антифунгальных, антивирусных препаратов, действующим началом которых могут являться фенольные соединения разных классов.

Для выделения антимикробных препаратов, содержащих фенольные соединения, можно использовать водно-спиртовую экстракцию и экстракцию органическими растворителями, главным образом эфирами [16].

Перспективным методом извлечения из сфагнового сырья антимикробного экстракта является обработка 20%-м раствором этилового спирта. При этом в выделенный комплекс, наряду с фенольными соединениями, переходят кислые полисахариды, поэтому такие экстракты могут проявлять высокую антимикробную активность, сочетая антибактериальное и антифунгальное действие [4, 5].

Основная цель работы – выделить природные соединения фенольного характера из сфагнового торфа и сфагновых мхов разных видов, исследовать их химический состав и антимикробные свойства.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований являлись спиртовые и эфирные экстракты из четырех образцов сфагнового мха: *Sph. magellanicum* (сфагнум магелланум), *Sph. fuscum* (сфагнум фускум), *Sph. angustifolium* (сфагнум ангустифолиум), *Sph. apiculatum* (сфагнум апикулятум) и сфагновый фускум-торф с $R = 10\%$. Геоботаническая, физико-химическая и химическая характеристики образцов выбранного сырья выполнены ранее [17].

Из всех образцов торфа и мха получены экстракты диэтиловым эфиром. Для этого навеску образца заливали серным эфиром с гидромодулем для мха 1 : 40, для торфа – 1 : 16. Экстракцию проводили трижды методом настаивания в течение 12 ч при комнатной температуре, каждый раз используя свежую навеску сырья.

При экстракции полярными растворителями извлекаются и некоторые нефенольные соединения – жирные кислоты, жирные спирты, сложные эфиры, битумы и другие, поэтому для получения экстрактов с большим содержанием фенольных соединений из фускум-мха и фускум-торфа изготовлены также экстракты этиловым эфиром после предварительного извлечения и удаления нефенольных соединений неполярным петролейным эфиром.

Для получения спиртовых экстрактов использованы только мох и торф фускум. Из них получены спиртовые экстракты 70%-м этиловым спиртом при комнатной температуре путем настаивания в течение 12 ч и 20%-м этиловым спиртом методом выдерживания в течение 2 ч при температуре 100 °C. Гидромодуль для мха составил 1 : 50, для торфа – 1 : 17.

С целью получения более концентрированных растворов экстракция всеми растворителями выполнена трижды, и каждый раз свежее сырье экстрагировали растворителем, отфильтрованным после предыдущей экстракции.

Для увеличения концентрации действующих веществ все эфирные экстракты упарены до объема 15–20 мл. В табл. 1 показаны номера образцов и условия получения экстрактов из мхов и торфов.

Для определения фенольных соединений спиртовые фракции использовали непосредственно в исходном виде, а аликовотные части эфирных фракций предварительно высушивали, а затем растворяли в 50%-м этаноле.

Таблица 1. Условия получения экстрактов из сфагновых мхов и торфов**Table 1. Conditions for obtaining extracts from sphagnum mosses and peats**

Номер образца	Сырье	Экстрагент	Температура, °C	Гидромодуль	Продолжительность, ч	
1	Мох фускум	Этиловый спирт 70%-й	20	1 : 50	12	
2	Торф фускум			1 : 17		
3	Мох фускум	Этиловый спирт 20%-й	100	1 : 50	2	
4	Торф фускум			1 : 17		
5	Мох фускум	Диэтиловый эфир	20	1 : 40	12	
6	Мох магелланикум					
7	Мох ангустифолиум					
8	Мох апикулятум			1 : 16		
9	Мох фускум после экстракции петролейным эфиром					
10	Торф фускум					
11	Торф фускум после экстракции петролейным эфиром					

Суммарное содержание свободных фенольных соединений определяли по методике, основанной на их взаимодействии с реагентом Фолина – Дениса (смеси фосфомолибденовой и фосфорвольфрамовой кислот) в присутствии углекислого натрия. В результате реакции развивается синее окрашивание, основанное на образовании молибденовой и вольфрамовой сини. Оптическую плотность окрашенных растворов измеряли на спектрофотометре при 725 нм. Количество фенольных соединений определяли по калибровочной кривой, построенной по хлорогеновой кислоте [16].

Для катехинов более специфическими являются реакции с п-диметиламинобензальдегидом и ванилином, что позволяет отличить их от других флавоноидов, содержащих С4 карбонильную группу. Содержание катехинов определяли, используя цветную реакцию с ванилиновым реагентом (1%-й раствор ванилина в соляной кислоте) с последующим определением количества катехинов спектрофотометрически, измеряя поглощение при 500 ммк [15].

Фенолкарбоновые кислоты в пересчете на хлорогеновую кислоту определяли по методике [16].

Количественное определение флавонолов осуществляли спектрофотометрически после разделения на колонке, заполненной катионитом Дауэкс по методике [16].

Массовую долю флавонолов, катехинов и фенолкарбоновых кислот определяли только в образцах, показавших выраженную антимикробную активность.

Исследование антибиотической активности полученных экстрактов выполнено в Институте микробиологии НАН Беларусь. Для ее оценки использовали фитопатогенные микроорганизмы сельскохозяйственных культур, выделенные на территории Беларусь, коллекционные штаммы из фонда Белорусской коллекции патогенных микроорганизмов и штаммы из коллекции «Центр аналитических и генетико-инженерных исследований» (табл. 2).

Таблица 2. Штаммы фитопатогенных бактерий и грибов, использованные в работе**Table 2. Strains of phytopathogenic bacteria and fungi used in the work**

Штамм	Предположительное систематическое положение	Сокращенное наименование микроорганизма	Источник выделения / Кем выделен	Вызываемое заболевание
Н. П.	<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i>	<i>C. michiganensis</i>	Томат сорта Раиса / Мямин В. Е., биофак БГУ	Бактериозы растений томата
3'	<i>Pseudomonas corrugata</i>	<i>P. corrugata</i>	Томат сорта Раиса / Мямин В. Е., биофак БГУ	Некроз сердцевины стеблей томата
DC3000	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i>	<i>P. syringae</i> pv. <i>tomato</i>	Коллекционный штамм	Бактериозы растений томата
E-2 (БИМ В-641)	<i>Erwinia amylovora</i>	<i>E. amylovora</i>	Листья яблони / Лагоненко А. Л., биофак БГУ	Бактериальный ожог плодовых культур
25.1	<i>Pectobacterium carotovorum</i>	<i>Pec. carotovorum</i>	Огурец сорта Кураж / Мямин В. Е., биофак БГУ	Мягкие гнили овощных культур
381	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>F. oxysporum</i>	Коллекционный штамм	Корневые гнили овощных культур
Г-4	<i>Alternaria</i> sp.	<i>Alternaria</i> sp.	Коллекционный штамм	Альтернариоз растений огурца

Глубинное культивирование бактерий осуществляли в полноценной среде LB [18] с аэрацией (200 об/мин) при температурах 28–30 °C в течение 24–48 ч. Грибные патогены выращивали в картофельно-глюкозном бульоне [19] с перемешиванием 120–160 об/мин при температуре 24 °C в течение 48 ч. Также исследуемые штаммы культивировали на агаризованных питательных средах (полнозаданный питательный агар (ППА) [20], LB-агар и БХ-агар (кат. №: МБ690-0,2/О101, производитель: ФБУН «ГНЦ ПМБ» Роспотребнадзора)) с содержанием агар-агара 0,7 или 2,0 %.

Для получения необходимого количества биомассы проводили культивирование штаммов *C. Michiganensis* H. P., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. amylovora* E-2, *Pec. carotovorum* 25.1, *F. oxysporum* 381, *Alternaria* sp. Г-4 на плотных питательных средах LB (для бактерий) и картофельно-глюкозной среде (для грибов), содержащие 2 % агар-агара (NEOFROXX, 1182GR100). Клетки культивировали в течение 24–48 ч при температурах 24–30 °C. Выросшие штаммы визуально анализировали на однородность формы и отсутствие колоний посторонних микроорганизмов.

Бактериальные штаммы фитопатогенных бактерий засевали бактериологической петлей в 10 мл LB бульона в конические колбы (Минимед). Грибные патогены выращивали в картофельно-глюкозном бульоне также в конических колбах (Минимед). Культуры фитопатогенных микроорганизмов выращивали до логарифмической фазы роста, которую устанавливали по оптической плотности культуры. Для определения оптической плотности извлекали 1 мл культуры и измеряли оптическую плотность при длине волны 600 нм (ОП₆₀₀) с помощью спектрофотометра SP-830 Plus (Metertech).

Для определения антимикробной активности образцов использовали модификацию двух методов (диффузии из лунок агара и агаровых блоков).

Модифицированный метод проводили в несколько этапов:

1) выращивали ночную культуру фитопатогенного микроорганизма до ОП₆₀₀ 1,0–1,2. Затем клеточную суспензию в объеме 500 мкл добавляли к 4,5 мл 0,7%-й агаризованной ППА-среды, после чего интенсивно перемешивали. Затем данную смесь насыщали на 2%-ю агаризованную ППА-среду, которую заранее разливали в чашки Петри и остужали до полного застывания среды. Параллельно из ночных культур производили высев по 100 мкл на питательные среды для проверки отсутствия контаминации;

2) после полного застывания среды в чашках Петри на поверхность агара, содержащего тест-культуру, наносили по 15 мкл суспензии исследуемого образца вытяжки и контроля. Чашки Петри стояли при комнатной температуре до полного впитывания образца в поверхность агаризованной среды;

3) чашки Петри с исследуемыми образцами помещали в термостат, выращивали 48 ч при температуре 24 °C для грибных фитопатогенов и в течение 24–48 ч – при температуре 30 °C для фитопатогенных бактерий. Результаты оценивали визуально по наличию или отсутствию зон задержки. Эксперимент для 11 вариантов вытяжек в отношении 7 фитопатогенов проводили в 4–7 биологических повторностях.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате выполнения работ из всех образцов выбранного сырья – сфагнового мха *Sph. magellanicum* (сфагнум-магелланум), *Sph. fuscum* (сфагнум-fuscum), *Sph. angustifolium* (сфагнум ангустифолиум), *Sph. apiculatum* (сфагнум апикулятум), а также фускус-торфа с R = 10 %, получены экстракти диэтиловым эфиром при комнатной температуре. Из фускус-мха и фускус-торфа выделены также экстракти диэтиловым эфиром после предварительного извлечения фенольных соединений неполярным петролейным эфиром.

Из этого же сырья – фускус-мха и фускус-торфа – проведена экстракция фенольных соединений 70%-м этиловым спиртом при комнатной температуре и 20%-м этанолом при температуре 100 °C. Целью экстракции более разбавленным 20%-м спиртом являлось получение комплексного препарата, содержащего фенольные соединения и полисахариды, которые, судя по литературным источникам, также могут проявлять биоцидные свойства по отношению к патогенным микроорганизмам.

Для увеличения концентрации действующих веществ все эфирные экстракти упарены до объема 15–20 мл.

В спиртовых и эфирных экстрактах мхов и торфа определено содержание свободных фенольных соединений, которые включают соединения разных классов, в том числе фенолкарбоновые кислоты, катехины, флавонолы, ароматические альдегиды, аминокислоты, спирты, эфиры и другие, содержащие фенольные группы.

В табл. 3 показаны выход экстрактов (% от органической массы сырья) и массовые доли органических веществ и свободных фенольных соединений в растворах экстрактов, переданных для испытаний на антимикробную активность.

Выход органических веществ в спиртовой раствор при экстракции 70%-м этанолом для мха составил 5,60 %, для торфа – 6,23 % от органического вещества сырья. Выход экстракта 20%-м этанолом для фускус-торфа был несколько ниже, чем для мха, и составил 4,88 и 6,79 % соответственно. В эфирные экстракти органических веществ переходило на порядок меньше, чем в спиртовые, как из торфа, так и из всех видов мха. Их выход находился на уровне 0,56–0,74 %. Концентрация органических веществ в растворах всех экстрактов составляла около 30–40 мг/мл.

Таблица 3. Выход экстрактов и содержание органических веществ и свободных фенольных соединений в экстрактах сфагновых мхов и торфов**Table 3. Extract yield and content of organic substances and free phenolic compounds in sphagnum moss and peat extracts**

Номер образца	Сырье	Экстрагент	Выход, % на органическое вещество сырья	Массовая доля, мг/мл	
				органических веществ	фенольных соединений
1	Мох фускум	Этиловый спирт 70%-й	5,60	32,1	27,04
2	Торф фускум		6,23	35,6	28,48
3	Мох фускум		6,79	39,0	33,59
4	Торф фускум		4,88	28,3	23,46
5	Мох фускум		0,62	37,1	29,50
6	Мох магелланикум		0,68	38,5	31,57
7	Мох ангустифолиум		0,74	39,0	33,54
8	Мох апикулятум		0,64	37,6	32,34
9	Мох фускум после экстракции петролейным эфиром		0,56	36,8	31,91
10	Торф фускум		0,69	38,8	32,98
11	Торф фускум после экстракции петролейным эфиром	Диэтиловый эфир	0,59	36,7	33,03

Массовая доля свободных фенольных соединений в спиртовых экстрактах, выделенных из фускум-мха 70%-м этианолом, составила 27,04 мг/мл, 20%-м этианолом при температуре 100 °C – 33,59, а из фускум-торфа – 28,48 и 32,34 мг/мл соответственно. Для фракций, выделенных диэтиловым эфиром, содержание свободных фенольных соединений в растворе для мхов находилось на уровне 29,50–33,54 мг/мл, для торфа – 30,70–32,98 мг/мл. Для образцов, выделенных диэтиловым эфиром после предварительного удаления соединений нефенольного характера петролейным эфиром, массовая доля фенольных соединений была несколько выше, чем для образцов, полученных без предварительной экстракции, и для фускум-мха составляла 31,91 мг/мл, а для фускум-торфа – 33,03 мг/мл.

Для определения антимикробной активности полученных экстрактов выбран спектр фитопатогенов томата, огурца, картофеля и плодовых культур. Отобраны пять бактериальных (*C. Michiganensis* H. П., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. amylovora* E-2, *Pec. carotovorum* 25.1) и два грибных (*F. oxysporum* 381, *Alternaria* sp. Г-4) фитопатогена, способных вызывать ряд заболеваний сельскохозяйственных культур.

Изучена биоцидная активность всех фенолсодержащих экстрактов, полученных из сфагнового мха и торфа, в отношении данного ряда фитопатогенных микроорганизмов. В табл. 4 приведены сводные данные по уровню антимикробной активности образцов в отношении этих штаммов патогенов.

Таблица 4. Уровень антимикробной активности эфирных и спиртовых экстрактов против фитопатогенных микроорганизмов**Table 4. Level of antimicrobial activity of essential and alcoholic extracts against phytopathogenic microorganisms**

Номер образца	Уровень антимикробной активности						
	<i>F. oxysporum</i>	<i>Alternaria</i> sp.	<i>E. amylovora</i>	<i>P. corrugata</i>	<i>Pec. carotovorum</i>	<i>P. syringae</i> pv. <i>tomato</i>	<i>C. michiganensis</i>
1	+	–	–	–	–	–	+
2	–	–	–	–	–	+	+
3	+	–	+	+	+	+	+
4	–	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	+	–	–	+
6	–	–	–	+	–	–	+
7	–	–	–	+	–	+	+
8	–	–	–	+	–	+	+
9	–	–	–	–	–	+	+
10	+	–	–	+	+	–	–
11	+	–	–	+	+	–	–

Наибольшую активность к широкому кругу фитопатогенов проявил спиртовой экстракт мха фускум 20%-м этианолом (образец 3), который подавлял рост всех возбудителей, за исключением *Alternaria* sp. Спиртовой экстракт мха фускум 70%-м этианолом (образец 1) был эффективен только в отношении *F. oxysporum* 381 и *C. michiganensis* H. П., а спиртовой экстракт торфа фускум 70%-м этианолом (образец 2) – в отношении бактерий *C. michiganensis* H. П., *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 и, в меньшей степени, в отношении грибного фитопатогена *F. oxysporum* 381. Для образца 4 (спиртовой экстракт торфа фускум 20%-м этианолом) активность в отношении всех исследуемых фитопатогенов отсутствовала.

Для эфирных экстрактов (образцы 5–11) показано, что каждый из них проявлял активность по отношению к определенным фитопатогенам. Экстракты диэтиловым эфиром сфагновых мхов фускум, магелланикум, ангустифолиум, апикулятум (варианты 5–8), а также вариант 9 – экстракт мха фускум диэтиловым эфиром с предварительной экстракцией нефенольных соединений петролейным эфиром подавляли рост *C. michiganensis* H. П.

В отношении возбудителя *P. corrugata* 3' проявляли антигонистическую активность экстракты диэтиловым эфиром всех сфагновых мхов (варианты 5–8), а также экстракты торфа фускум только диэтиловым эфиром и диэтиловым эфиром после предварительной экстракции петролейным эфиром (варианты 10 и 11). Для последних зафиксирована также активность в отношении *Pec. carotovorum* 25.1 и *F. oxysporum* 381.

Развитие фитопатогена *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, кроме спиртовых экстрактов 2 и 3, подавляли также экстракты мхов ангустифолиум и апикулятум диэтиловым эфиром (варианты 7 и 8), а также экстракт мха фускум диэтиловым эфиром после предварительной экстракции петролейным эфиром (вариант 9).

Для образцов экстрактов, проявивших наиболее высокие antimикробные свойства, проведено более детальное исследование состава фенольных соединений. Для этого выбраны пять экстрактов: образец 3 – спиртовой экстракт фускум-мха 20%-м этианолом при температуре 100 °C, образец 7 – экстракт фускум-мха диэтиловым эфиром, образец 8 – экстракт мха апикулятум диэтиловым эфиром, образец 10 – экстракт фускум-торфа диэтиловым эфиром и образец 11 – экстракт фускум-мха диэтиловым эфиром после предварительной экстракции петролейным эфиром.

В выбранных образцах определено содержание катехинов (табл. 5).

Таблица 5. Содержание катехинов в исследуемых образцах

Table 5. Content of catechins in the studied samples

Номер образца	Образец	Содержание катехинов	
		мг/мл в растворе	% от суммы фенольных соединений
3	Экстракт мха фускум 20%-м этианолом при температуре 100 °C	1,85	5,51
7	Экстракт мха ангустифолиум диэтиловым эфиром	1,78	5,32
8	Экстракт мха апикулятум диэтиловым эфиром	1,76	5,45
10	Экстракт фускум-торфа диэтиловым эфиром	1,70	5,15
11	Экстракт фускум-торфа диэтиловым эфиром после экстракции петролейным эфиром	1,89	5,72

Массовая доля катехинов в спиртовом экстракте мха 20%-м этианолом при температуре 100 °C составляла 1,85 мг/мл, в образцах экстрактов мхов диэтиловым эфиром – 1,76–1,78, фускум-торфа – 1,70, а фускум-торфа после предварительного удаления нефенольных соединений петролейным эфиром – 1,89 мг/мл. При этом катехинами в исследуемых образцах представлено 5,15–5,72 % свободных фенольных соединений.

В табл. 6 помещены результаты определения фенолкарбоновых кислот в выбранных образцах.

Наибольшее количество фенолкарбоновых кислот (2,42 мг/мл) содержит экстракт фускум мха 20 %-ным спиртом, полученный при повышенной температуре. В эфирных экстрактах мхов содержание кислот составляет 1,42–2,23 мг/мл. Значительно меньше фенолокислот содержится в экстракте фускум-торфа диэтиловым эфиром – 1,42 мг/мл, а их концентрация в экстракте этого торфа диэтиловым эфиром, полученным после предварительного удаления нефенольных соединений петролейным эфиром, заметно больше и составляет 1,82 мг/мл. Фенолкарбоновыми кислотами в экстрактах сфагновых мхов представлено 6,49–7,21 % свободных фенольных соединений, в то время как в экстрактах торфа – 4,30–5,51 %.

Таблица 6. Содержание фенолкарбоновых кислот в экстрактах**Table 6. Content of phenolcarboxylic acids in extracts**

Номер образца	Образец	Содержание фенолкарбоновых кислот	
		мг/мл в растворе	% от суммы фенольных соединений
3	Экстракт мха фускум 20%-м этиловым эфиром при температуре 100 °C	2,42	7,21
7	Экстракт мха ангустифолиум диэтиловым эфиром	2,18	6,49
8	Экстракт мха апикуллятум диэтиловым эфиром	2,23	6,89
10	Экстракт торфа фускум-торфа диэтиловым эфиром	1,42	4,30
11	Экстракт фускум-торфа диэтиловым эфиром после экстракции петролейным эфиром	1,82	5,51

Результаты определения флавонолов в экстрактах сфагновых мхов и торфа представлены в табл. 7.

Таблица 7. Содержание флавонолов в исследуемых образцах**Table 7. Flavonols content in the studied samples**

Номер образца	Образец	Содержание флавонолов	
		мг/мл в растворе	% от суммы фенольных соединений
3	Экстракт мха фускум 20%-м этиловым эфиром при температуре 100 °C	10,18	30,31
7	Экстракт мха ангустифолиум диэтиловым эфиром	9,72	29,00
8	Экстракт мха апикуллятум диэтиловым эфиром	8,19	25,31
10	Экстракт торфа фускум диэтиловым эфиром	10,87	32,95
11	Экстракт торфа фускум диэтиловым эфиром после экстракции петролейным эфиром	12,05	36,49

Полученные результаты свидетельствуют о том, что основную долю фенольных соединений спиртовых и эфирных экстрактов сфагновых мхов и торфа составляют флавонолы. Веществами этого класса представлено 30,31 % всех свободных фенольных соединений спиртового 20%-го экстракта фускум мха, 25,31–29,00 % эфирных экстрактов сфагновых мхов, 32,95 % сфагнового фускум-торфа диэтиловым эфиром и 36,49 % экстракта этого торфа диэтиловым эфиром после предварительной экстракции петролейным эфиром.

Выводы.

1. Из четырех образцов сфагнового мха: *Sph. magellanicum*, *Sph. fuscum*, *Sph. angustifolium*, *Sph. apiculatum* и сфагнового фускум-торфа с R = 10 % выделено 11 образцов экстрактов, содержащих фенольные соединения: четыре образца получены экстракцией этиловым спиртом фускум-мха и фускум-торфа, пять образцов – диэтиловым эфиром из мха и торфа, два образца – из фускум-мха и фускум-торфа экстракцией диэтиловым эфиром после предварительной обработки сырья петролейным эфиром, который удаляет соединения нефенольного характера.

2. Установлено, что массовая доля свободных фенольных соединений в образцах спиртовых и эфирных экстрактов составляет 23,46–33,70 мг/мл.

3. Исследовано содержание отдельных групп фенольных соединений в экстрактах мхов и торфа, проявивших наиболее высокую антимикробную активность. Массовая доля катехинов в экстрактах мхов составляет 5,32–5,51 %, торфа – 5,15 %; фенолкарбоновых кислот – 6,49–7,21 % для экстрактов мхов и 4,30 % для экстракта торфа, а флавонолов – 25,31–30,31 и 36,49 % от суммарного содержания фенольных соединений соответственно.

4. С использованием модифицированного метода отсроченного антагонизма изучена биоцидная активность выделенных фенолсодержащих экстрактов, в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов: *C. michiganensis* Н. П., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. amylovora* E-2, *Pec. carotovorum* 25.1, *F. oxysporum* 381, *Alternaria* sp. Г-4, способных вызывать заболевания сельскохозяйственных культур. Установлено, что наибольшую антимикробную активность в отношении широкого спектра фитопатогенных микроорганизмов проявил спиртовой экстракт, полученный из мха фускум

20%-м этанолом при температуре 100 °C (образец 3). Показана антагонистическая активность данного образца в отношении бактерий *C. michiganensis* H. П., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. amylovora* E-2, *Pec. carotovorum* 25.1 и гриба *F. oxysporum* 381. Спиртовой экстракт мха фускум 70%-м этанолом проявлял активность только в отношении *F. oxysporum* 381 и *C. michiganensis* H. П., а фускум-торфа – бактерий *C. michiganensis* H. П., *P. syringae* pv. *tomato* DC3000. Экстракты диэтиловым эфиром сфагновых мхов всех видов подавляли рост *C. michiganensis* H. П. и *P. corrugata* 3'. Для экстрактов фускум-торфа диэтиловым эфиром и диэтиловым эфиром после предварительной экстракции петролейным эфиром зафиксирована антагонистическая активность в отношении *P. corrugata* 3', *Pec. carotovorum* 25.1 и *F. oxysporum* 381. Против фитопатогена *P. syringae* pv. *tomato* DC3000 проявили активность эфирные экстракты мхов ангустифолиум, апикулятум и фускум.

Список использованных источников

1. Наумова, Г. В. Торф в биотехнологии / Г. В. Наумова. – Минск : Наука и техника, 1987. – С. 60–84.
2. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларуская наука, 2009. – С. 56–141.
3. Биохимия фенольных соединений / под ред. Дж. Харборна. – М. : Мир, 1968.– 461 с.
4. Бабешина, Л. Г. Сфагновые мхи Западно-Сибирской равнины: морфология, анатомия, экология и применение в медицине : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Л. Г. Бабешина. – Томск, 2011. – 42 с.
5. Дмитрук, В. Н. Сравнительное фармакогностическое исследование рода *Sphagnum* и перспективы их использования : автореф. дис. ... канд. фарм. наук / В. Н. Дмитрук. – Самара, 2008. – 22 с.
6. Бабешина, Л. Г. Поиск источников БАВ противогрибкового действия среди сфагнов Томской области / Л. Г. Бабешина, С. Е. Дмитрук, И. Ф. Гусев // Современные изыскания в области фармации. – Ярославль, 1996. – С. 112–113.
7. Фармакологическая активность этанольного экстракта из сфагнума бурого (*Sphagnum fuscum (Shimp) Klinggr*) / М. В. Белоусов [и др.] // Химия растительного сырья. – 2008. – № 3 – С. 129–134.
8. Экология и продуктивность сфагновых мхов, используемых в качестве лекарственного сырья / Е. Я. Мульдиров [и др.] // Проблемы изучения растительного покрова Сибири. – Томск, 1995. – С. 107–111.
9. Биологически активные вещества и антигрибковые свойства сфагновых мхов, торфа и сапропелей / А. В. Карбышев [и др.] // Физиолого-биохимические аспекты изучения лекарственных растений : материалы Междунар. совещания, посвящ. памяти В. Г. Минаевой. – Новосибирск, 1998. – С. 28.
10. Экология сфагновых мхов Томской области и перспективы их использования в медицине / Л. Г. Бабешина [и др.] // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : материалы 2-й Всерос. конф. – Барнаул, 2005. – Кн. 2.– С. 646–649.
11. Фенольные соединения сфагнового торфа / Г. В. Наумова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2013. – № 1.– С. 24–27.
12. Запрометов, М. Н. Фенольные соединения / М. Н. Запрометов. – М. : Наука, 1993. – 272 с.
13. Барабой, В. А. Растительные фенолы и здоровье человека / В. А. Барабой. – М. : Наука, 1984.– 160 с.
14. Бабешина, Л. И. История и перспективы использования сфагновых мхов в медицине / Л. И. Бабешина, Н. И. Капус. – Томск, 2016.– 189 с.
15. Запрометов, М. Н. Биохимия катехинов / М. Н. Запрометов. – М. : Наука, 1984. – 245 с.
16. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. – Л. : Агропромиздат, 1987. – С. 112–113.
17. Подбор и характеристика торфяного и растительного сырья для получения биоцидных препаратов / Г. В. Наумова [и др.] // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 125–135.
18. Bertani, G. Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic *Escherichia coli* / G. Bertani // J. Bacteriol. – 1951. – Vol. 62, № 3. – P. 293–300.
19. Wongjiratthiti, A. Utilisation of local crops as alternative media for fungal growth / A. Wongjiratthiti, S. Yottakot // Pertanika J. Trop. Agric. Sci. – 2017. – Vol. 40. – P. 295–304.
20. Лысак, В. В. Микробиология : методические рекомендации к лабораторным занятиям, контроль самостоятельной работы студентов / В. В. Лысак, Р. А. Желдакова. – Минск : БГУ, 2002. – 100 с.

References

1. Naumova G. V. *Torf v biotekhnologii* [Peat in biotechnology]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1987, pp. 60–84. (in Russian)
2. Tomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and the products of its proceeding]. Minsk, Belarusskaya nauka Publ., 2009, pp. 56–141. (in Russian)
3. *Biohimiya fenol'nyh soedinenij* [Biochemistry of phenolic compounds]. Ed. by J. Harborne. Moscow, Mir Publ., 1968, 461 p. (in Russian)
4. Babeshina L. G. *Sfagnovye mhi Zapadno-Sibirskoj ravniny: morfologiya, anatomiya, ekologiya i primenenie v medicinu* [Sphagnum mosses of West Siberian plain: morphology, anatomy, ecology and application in medicine. Dr. biol. sci. abstract diss.]. Tomsk, 2011, 42 p. (in Russian)
5. Dmitruk V. N. *Sravnitel'noe farmakognosticheskoe issledovanie roda Sphagnum i perspektivy ih ispol'zovaniya* [Comparative pharmacognostic study of the genus Sphagnum and prospects for their use. Cand. farm. sci. abstract diss.]. Samara, 2008, 22 p. (in Russian)
6. Babeshina L. G., Dmitruk S. E., Gusev I. F. *Poisk istochnikov BAV protivogribkovogo dejstviya sredi sfagnov Tomskoj oblasti* [Search for sources of BAS antifungal action among sphagnum of Tomsk Region]. *Modern research in the field of pharmacy*. Yaroslavl, 1996, pp. 112–113. (in Russian)
7. Belousov M. V. et al. *Farmakologicheskaya aktivnost' e'tanol'nogo e'kstrakta iz sfagnuma burogo (Sphagnum fuscum (Shimp))* [Pharmacological activity of ethanol extract of brown sphagnum (*Sphagnum fuscum (Shimp) Klinggr.*)]. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 2008, no. 3, pp. 129–134. (in Russian)
8. Mul'dirov E. Ya., Babeshina L. G., Dmitruk S. E., Gusev I. F. *Ekologiya i produktivnost' sfagnovyh mhov, ispol'zuemyh v kachestve lekarstvennogo syr'ya* [Ecology and productivity of sphagnum mosses used as medicinal raw material]. *Problems of studying vegetation cover of Siberia*. Tomsk, 1995, pp. 107–111. (in Russian)
9. Karbyshev A. B., Dmitruk S. E., Babeshina L. G., Ismatova P. P. *Biologicheski aktivnye veshchestva i antigribkovye svojstva sfagnovyh mhov, torfa i sapropelej* [Biologically active substances and antifungal properties of sphagnum mosses, peat and sapropels]. *Fiziologo-biohimicheskie aspekty izucheniya lekarstvennyh rastenij : materialy Mezhdunar. soveshchaniya, posv. pamjati V. G. Minaevoj* [Proc. of the Int. Meeting in memory of V. G. Minaeva "Physiological and biochemical aspects of the study of medicinal plants"]. Novosibirsk, 1998, p. 28. (in Russian)
10. Babeshina L. G., Dmitruk V. N., Dmitruk S. E., Okhotina N. S., Korzh A. E. *Ekologiya sfagnovyh mhov Tomskoj oblasti i perspektivy ih ispol'zovaniya v medicinu* [Ecology of sphagnum mosses of Tomsk region and prospects for their use in medicine]. *Novye dostizheniya v himii i himicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya : materialy 2-j Vseros. konf.* [Proc. of the 2nd all-Russian Conf. "New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials"]. Barnaul, 2005, book 2, pp. 646–649. (in Russian)
11. Naumova G. V., Thomson A. E., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F. *Fenol'nye soedineniya sfagnovo-go torfa* [Phenolic compounds of sphagnum peat]. *Solid fuel chemistry*, 2013, no. 1, pp. 24–27. (in Russian)
12. Zaprometov M. N. *Fenol'nye soedineniya* [Phenolic compounds]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 272 p. (in Russian)
13. Baraboj V. A. *Rastitel'nye fenoly i zdrovor'e cheloveka* [Plant phenolics and human health]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 160 p. (in Russian)
14. Babeshina L. I., Kapus N. I. *Istoriya i perspektivy ispol'zovaniya sfagnovyh mhov v medicinu* [History and prospects of the use of sphagnum mosses in medicine]. Tomsk, Nauka Publ., 2016, 189 p. (in Russian)
15. Zaprometov M. N. *Biohimiya katekhinov* [Biochemistry of catechins]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 245 p. (in Russian)
16. *Metody biohimicheskogo issledovaniya rastenij* [Methods of biochemical study of plants]. Ed. by A. I. Ermakov. Leningrad, 1987, pp. 112–113. (in Russian)
17. Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Makeenko A. A., Navosha Yu. Yu., Kalilets L. P. *Podbor i harakteristika torfyanogo i rastitel'nogo syr'ya dlya poluchenija biocidnyh preparatov* [Selection and characterization of peat and vegetable raw materials for obtaining biocidal preparations]. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 125–135. (in Russian)
18. Bertani G. Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.*, 1951, vol. 62, no. 3, pp. 293–300.
19. Wongjirathiti A., Yottakot S. Utilisation of local crops as alternative media for fungal growth. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.*, 2017, vol. 40, pp. 295–304.
20. Lysak V. V., Zheldakova R. A. *Mikrobiologiya : metodicheskie rekomendacii k laboratornym zanyatiyam, kontrol' samostoyatel'noj raboty studentov* [Microbiology: methodological recommendations for laboratory classes, control of students' independent work]. Minsk, 2002, 100 p. (in Russian)

Информация об авторах

Жмакова Надежда Анатольевна – кандидат технических наук, 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, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Овчинникова Татьяна Феликсовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Семенчукова Екатерина Александровна – научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: eka2105@mail.ru

Муратова Анна Алексеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: anya.muratova.93@mail.ru

Information about the authors

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D. (Technical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Natalya L. Makarova – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Tatiyana F. Ovchinnikova – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Katsiaryna A. Semenchukova – Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: eka2105@mail.ru

Anna A. Muratova – Ph. D. (Biological), Senior Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: anya.muratova.93@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-1-217-222>

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

Поступила в редакцию 30.03.2023

Received 30.03.2023

ВЛИЯНИЕ ФУНГИЦИДНЫХ ПРЕПАРАТОВ РАЗНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НА НАКОПЛЕНИЕ ГИДРОКСИКОРИЧНЫХ КИСЛОТ, ПЕКТИНОВЫХ И ДУБИЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПЛОДАХ *VACCINIUM CORYMBOSUM* L. В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

Ж. А. Рупасова¹, Н. Б. Криницкая¹, Д. О. Сулим¹, К. А. Добрянская¹,
В. С. Задаля¹, Н. Б. Павловский¹, А. Г. Павловская¹, Э. И. Коломиец²,
З. М. Алещенкова², М. Н. Мандрик-Литвинкович², **И. И. Лиштван³**

¹Центральный ботанический сад НАН Беларусь, Минск, Беларусь;

²Институт микробиологии НАН Беларусь, Минск, Беларусь;

³Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. В связи с совершенствованием биологических систем защиты посадок голубики высокорослой от фитопатогенов в условиях Беларуси представляется весьма актуальным и целесообразным использование в этих целях микробных препаратов, обеспечивающее получение высококачественной экологически чистой ягодной продукции, что согласуется с принятым в Республике Беларусь в ноябре 2018 г. Законом «О производстве и обращении органической продукции», запрещающим использование в растениеводческих технологиях любых химических средств, в том числе фунгицидного действия. Для реализации этой цели в Ганцевичском районе Брестской области были впервые проведены испытания нового жидкого бактериального препарата *ХелсБеррин*, разработанного в Институте микробиологии НАН Беларусь на основе клеток, спор и продуктов метаболизма бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* B.16 и *Bacillus amyloliquefaciens* 3.9 для защиты плодовых культур от болезней. Наряду с этим было проведено испытание еще одной формы данного препарата в сочетании с 2%-м раствором *Гумата калия*.

Оценку эффективности обозначенных фунгицидов проводили на основе исследования в опытной культуре степени воздействия их разных доз и кратности обработок растений на основные параметры развития и биохимический состав плодов в сравнении с химическим фунгицидом *Беллис*, разрешенным для использования на территории республики на посадках голубики высокорослой. Особый интерес при этом представляло исследование влияния обозначенных препаратов на содержание в ее плодах гидроксикоричных кислот, пектиновых и дубильных веществ (танинов), оказывающих многостороннее физиологическое действие на организм, что и определило цель настоящей работы.

Ключевые слова: голубика; фунгицидные препараты; гидроксикоричные кислоты; пектиновые вещества; дубильные вещества.

Для цитирования. Рупасова Ж. А., Криницкая Н. Б., Сулим Д. О., Добрянская К. А., Задаля В. С., Павловский Н. Б., Павловская А. Г., Коломиец Э. И., Алещенкова З. М., Мандрик-Литвинкович М. Н., **Лиштван И. И.** Влияние фунгицидных препаратов разной химической природы на накопление гидроксикоричных кислот, пектиновых и дубильных веществ в плодах *Vaccinium corymbosum* L. в условиях Беларусь // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 217–222.

INFLUENCE OF FUNGICIDE PREPARATIONS OF DIFFERENT CHEMICAL NATURE ON THE ACCUMULATION OF HYDROXYCINNAMIC ACIDS, PECTIN AND TANNIES IN *VACCINIUM CORYMBOSUM* L. FRUIT UNDER THE CONDITIONS OF BELARUS

Zh. A. Rupasova¹, N. B. Krinitskaya¹, D. O. Sulim¹, K. A. Dobryanskaya¹,
V. S. Zadalia¹, N. B. Pavlovsky¹, A. G. Pavlovskaya¹, E. I. Kolomiets²,
Z. M. Aleshchenkova², M. N. Mandrik-Litvinovich², **I. I. Lishtvan³**

¹Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

³Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. In connection with the improvement of biological systems for the protection of plantings of tall blueberries from phytopathogens in the conditions of Belarus, it is assumed that it is very likely and promising to use microbial diseases in these cases, improve the increased ecological purity of berry products, which is consistent with the application in Belarus in November 2018 by the Law "On the production and prohibition of organic products", which prohibits

the use of any American products in crop technologies, including the volume of fungicidal action. To achieve this goal, in the Gantsevichi district of the Brest region. For the first time, a new liquid bacterial preparation, *HealthBerrin*, developed at the Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, was tested on the basis of cells, spores and food products of *Bacillus amyloliquefaciens* B.16, *Bacillus amyloliquefaciens* 3.9 bacteria to protect crop fruits from diseases. Along with this, another test of this drug was carried out in doses with a 2 % solution of potassium humate.

Evaluation of the effectiveness of fungicides, carried out on the basis of a study in the experimental culture of the degree of exposure to various doses and the frequency of plant treatments based on the main development parameters and the biochemical composition of the results of the study with the *Bellis* chemical fungicide, approved for use on the territory of the Republic on tall blueberry plantations. Of particular interest was the study of identified diseases for the content in its fruits of hydroxycinnamic acids, pectin and tannin manifestations (tannins), which have a multifaceted physiological effect on the organ, which is determined by the whole essence of the work.

Keywords: blueberries; fungicides; hydroxycinnamic acids; pectins; tannins.

For citation. Rupasova Zh. A., Krinitskaya N. B., Sulim D. O., Dobryanskaya K. A., Zadalia V. S., Pavlovsky N. B., Pavlovskaya A. G., Kolomiets E. I., Aleshchenkova Z. M., Mandrik-Litvinkovich M. N., Lishtvan I. I. Influence of fungicide preparations of different chemical nature on the accumulation of hydroxycinnamic acids, pectin and tannins in *Vaccinium corymbosum* L. fruit under the conditions of Belarus. *Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 217–222.

Методика и материалы исследований. Исследования выполнены на примере сорта *Bluecrop* голубики высокорослой в рамках двух полевых экспериментов с идентичной шестивариантной схемой обработок растений в период созревания плодов, но при разном уровне плодородия почвы: менее высоком – на экспериментальном участке отраслевой лаборатории интродукции и технологии ягодных растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси (ЭБ) и более высоком – расположенным на 10 км севернее крестьянско-фермерского хозяйства «Ягодное лукошко» (КФК):

вариант 1 – контроль (обработка водой);

вариант 2 – обработка растений водно-диспергируемыми гранулами химического фунгицида *Беллис* из расчета 0,8 кг/га при норме расхода 2 г/л;

варианты 3 и 4 – дву- и четырехкратная обработка жидким микробным препаратом *ХелсБеррин* из расчета 20 л/га при норме расхода 50 мл/л соответственно;

варианты 5 и 6 – дву- и четырехкратная обработка жидким биологическим препаратом *ХелсБеррин* в сочетании с 2%-м Гуматом калия из расчета 20 л/га при норме расхода 50 мл/л соответственно.

В варианте опыта с двукратной обработкой растений первая по времени совпадала со второй обработкой в варианте с четырехкратной обработкой, тогда как вторая обработка проводилась за 3–5 дней до сбора плодов. В варианте с четырехкратной обработкой первую проводили по завершении цветения растений, две последующие – через каждые 10 дней, а последнюю – за 3–5 дней до сбора плодов. Норма расхода рабочей жидкости на одну обработку составляла 2 л на каждый вариант опыта в двукратной повторности.

Почва на экспериментальном участке отраслевой лаборатории Центрального ботанического сада НАН Беларуси – торфяно-глеевая, мелиорированная, развитая на слое пушицео-сфагнового верхового торфа, подстилаемом с глубины 50 см рыхлым, разнозернистым песком. Торф среднеразложившийся, с зольностью 15 % и содержанием P_2O_5 – 131 мг/кг, K_2O – 180, Ca – 246, Mg – 32 мг/кг. Реакция почвенного раствора (pH_{H_2O}) в пристволовой зоне посадок голубики варьировалась в диапазоне 4,9–6,2, тогда как у мульчирующего слоя (древесные опилки) она составляла 4,9–5,3, а в междуурядьях – 4,7–5,1.

Почва на участке КФХ «Ягодное лукошко» – дерново-подзолистая, супесчаная, с содержанием гумуса 3,5 %, P_2O_5 – 285 мг/кг, K_2O – 74, Ca – 982, Mg – 124 мг/кг. Реакция почвенного раствора (pH_{H_2O}) в пристволовой зоне посадок голубики соответствовала области более низких, чем на предыдущем участке, значений – от 3,8 до 4,9, при pH мульчирующего слоя (древесные опилки) в пределах от 4,7 до 4,8, а в междуурядьях – от 5,0 до 5,7.

При выполнении аналитических работ в высушенных при температуре 60 °C пробах растительного материала определяли содержание гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую) – спектрофотометрическим методом [1]; пектиновых веществ – кальциево-пектатным методом [2]; дубильных веществ (танинов) – титрометрическим методом Левенталя [3]. Все аналитические определения выполнены в двукратной биологической и трехкратной аналитической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Показанные выше различия субстратной основы в полевых экспериментах, на наш взгляд, могли отразиться на восприимчивости опытных растений к воздействию испытываемых фунгицидных препаратов, что нашло подтверждение в результатах биохимических исследований. Как следует из табл. 1, плоды голубики в эксперименте на территории ЭБ характеризовались несколько меньшим, чем в КФХ, содержанием в сухой массе гидроксикоричных кислот, изменявшимся в соответствующих диапазонах – 662,6–1045,2 мг/100 г и 887,4–1061,0 мг/100 г.

При этом аналогичные интервалы изменения содержания пектиновых и дубильных веществ (танинов) были весьма близки в обоих экспериментах и составляли 5,85–6,72 и 5,79–6,80 %, 2,08–2,56 и 2,05–2,37 % соответственно. Вместе с тем ширина приведенных выше диапазонов варьирования исследуемых показателей биохимического состава плодов голубики в рамках обоих полевых экспериментов свидетельствовала об определенном влиянии на них испытываемых фунгицидных препаратов. Для количественной оценки этого влияния были определены относительные различия данных показателей с контролем в вариантах опытов с применением последних, приведенные в табл. 2. Различия эдафических условий в данных экспериментах оказали существенное влияние на темпы биосинтеза в ягодной продукции гидроксикоричных кислот. Так, в опыте на ЭБ большинство испытываемых агроприемов обусловливали активизацию их накопления на 12–50 % относительно контроля, наиболее существенную на фоне обработок растений ХелсБеррином в сочетании с Гуматом калия, и лишь при отдельном четырехкратном применении ХелсБеррина отмечено незначительное снижение содержания данных соединений. При этом в эксперименте на территории КФХ наблюдалась противоположная картина, свидетельствовавшая об обеднении ими плодов голубики на 13–16 % по сравнению с контролем.

Таблица 1. Содержание гидроксикоричных кислот, пектиновых и дубильных веществ (в сухой массе) в плодах *V. corymbosum* в вариантах полевых опытов

Table 1. The content of hydroxycinnamic acids, pectin and tannins (in dry weight) in the fruits of *V. corymbosum* in the variants of field experiments

Показатель	Гидроксикоричные кислоты, мг/100 г		Пектиновые вещества, %		Дубильные вещества, %	
	X ± st	t _{Ct}	X ± st	t _{Ct}	X ± st	t _{Ct}
<i>Отраслевая лаборатория интродукции и технологии ягодных растений</i>						
1. Контроль	698,1 ± 6,8	—	5,85 ± 0,04	—	2,08 ± 0,01	—
2. Беллис	792,8 ± 6,8	9,8*	6,05 ± 0,05	3,0*	2,27 ± 0,03	4,6*
3. Х/Б, 2-я обработка	781,0 ± 20,5	3,8*	6,25 ± 0,04	6,7*	2,12 ± 0,01	1,7
4. Х/Б, 4-я обработка	662,6 ± 6,8	-3,7*	6,43 ± 0,05	9,5*	2,56 ± 0,01	18,6*
5. Х/Б + Гумат К, 2-я обработка	934,8 ± 6,8	24,5*	6,62 ± 0,04	12,9*	2,43 ± 0,01	13,6*
6. Х/Б + Гумат К, 4-я обработка	1045,2 ± 14,2	22,0*	6,72 ± 0,05	12,7*	2,43 ± 0,01	13,6*
<i>Крестьянско-фермерское хозяйство «Ягодное лукошко»</i>						
1. Контроль	1061,0 ± 3,9	—	5,79 ± 0,05	—	2,05 ± 0,01	—
2. Беллис	887,4 ± 6,8	-22,0*	6,13 ± 0,07	4,1*	2,18 ± 0,01	4,7*
3. Х/Б, 2-я обработка	922,9 ± 6,8	-17,5*	6,37 ± 0,04	9,0*	2,25 ± 0,01	5,4*
4. Х/Б, 4-я обработка	919,0 ± 10,4	-12,7*	6,48 ± 0,05	10,0*	2,31 ± 0,01	9,2*
5. Х/Б + Гумат К, 2-я обработка	1057,0 ± 3,9	-0,7	6,68 ± 0,04	13,4*	2,37 ± 0,01	12,4*
6. Х/Б + Гумат К, 4-я обработка	922,9 ± 6,8	-17,5*	6,80 ± 0,04	15,7*	2,37 ± 0,01	12,4*

* Статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия с контролем при $p < 0,05$.

Таблица 2. Относительные различия с контролем вариантов опыта с применением фунгицидных препаратов по характеристикам биохимического состава плодов *V. corymbosum*, %

Table 2. Relative differences with the control variants of the experiment with the use of fungicidal preparations according to the characteristics of the biochemical composition of the fruits of *V. corymbosum*, %

Показатель	Вариант опыта				
	Беллис	Х/Б, 2-я обработка	Х/Б, 4-я обработка	Х/Б + Гумат К, 2-я обработка	Х/Б + Гумат К, 4-я обработка
<i>Отраслевая лаборатория интродукции и технологии ягодных растений</i>					
Гидроксикоричные кислоты	+13,6	+11,9	-5,1	+33,9	+49,7
Пектиновые вещества	+3,4	+6,8	+9,9	+13,2	+14,9
Дубильные вещества	+9,1	—	+23,0	+16,8	+16,8
Совокупный эффект	+26,1	+18,7	+27,8	+63,9	+81,4
<i>Крестьянско-фермерское хозяйство «Ягодное лукошко»</i>					
Гидроксикоричные кислоты	-16,4	-13,0	-13,4	—	-13,0
Пектиновые вещества	+5,9	+10,0	+11,9	+15,4	+17,4
Дубильные вещества	+6,3	+9,8	+12,7	+15,6	+15,6
Совокупный эффект	-4,2	+6,8	+11,2	+31,0	+20,0

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий с контролем при $p < 0,05$.

Вместе с тем в обоих экспериментах под действием испытываемых фунгицидов выявлены однотипные тенденции в активизации биосинтеза пектиновых и дубильных веществ, наиболее выразительные при использовании микробных препаратов и приведшие к увеличению их содержания на территории ЭБ на 3–15 и 9–23 %, на территории КФХ – на 6–17 и 6–16 % относительно контроля соответственно. Для выявления интегральной картины результативности фунгицидных препаратов разной химической природы в отношении исследуемых органических соединений в каждом варианте обоих экспериментов было осуществлено суммирование относительных размеров выявленных различий с контролем параметров их накопления и с учетом знака, дающее представление о совокупном эффекте от испытываемых агроприемов (см. табл. 2).

Как видим, позитивное действие испытываемых препаратов на совокупность данных биохимических характеристик плодов голубики в опыте на ЭБ оказалось в среднем в 2–4 раза выше, нежели в условиях КФХ, причем в обоих экспериментах наиболее успешными в этом плане были обработки растений *ХелсБеррином* в сочетании с *Гуматом калия* – четырехкратные в первом случае и двукратные во втором. При этом в опыте на ЭБ наименее результативным следовало признать двукратное применение *ХелсБеррина*, тогда как на территории КФХ – использование химического фунгицида *Беллис*, для которого был показан даже незначительный совокупный отрицательный эффект.

На основании результатов биохимического скрининга плодов *V. corymbosum* в рамках обоих полевых экспериментов были выявлены варианты с наибольшими и соответственно наименьшими значениями исследуемых показателей. Как следует из табл. 3, в опыте на территории ЭБ наиболее высоким содержанием гидроксикоричных кислот и пектиновых веществ характеризовалась ягодная продукция варианта с четырехкратной обработкой растений *ХелсБеррином* в сочетании с *Гуматом калия*, а дубильных веществ – продукция варианта с четырехкратной обработкой *ХелсБеррином*, обеспечившей минимальное накопление в ней гидроксикоричных кислот. На фоне двукратного применения данного препарата выявлено наименьшее содержание в плодах дубильных веществ, сопоставимое с таковым в контроле, характеризовавшемся также минимальным накоплением пектиновых веществ.

Таблица 3. Варианты полевых опытов с наибольшими (max) и наименьшими (min) биохимическими характеристиками плодов *V. corymbosum*

Table 3. Variants of field experiments with the highest (max) and lowest (min) biochemical characteristics of *V. corymbosum* fruits

Показатель	Вариант опыта					
	Кон-троль	Беллис	X/B, 2-я обработка	X/B, 4-я обработка	X/B + Гумат К, 2-я обработка	X/B + Гумат К, 4-я обработка
<i>Отраслевая лаборатория интродукции и технологии ягодных растений</i>						
Гидроксикоричные кислоты	–	–	–	min	–	max
Пектиновые вещества	min	–	–	–	–	max
Дубильные вещества	min	–	min	max	–	–
<i>Крестьянско-фермерское хозяйство «Ягодное лукошко»</i>						
Гидроксикоричные кислоты	max	min	–	–	max	–
Пектиновые вещества	min	–	–	–	–	max
Дубильные вещества	min	–	–	–	max	max

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий с контролем при *p* < 0,05.

В отличие от эксперимента на ЭБ, в полевом опыте на территории КФХ максимальное содержание в плодах гидроксикоричных кислот, сопоставимое с таковым в контроле, установлено при двукратной обработке растений *ХелсБеррином* в сочетании с *Гуматом калия*, обусловившей также наиболее высокое содержание в них дубильных веществ. Вместе с тем, как и в эксперименте на ЭБ, максимальное накопление пектиновых веществ все же было выявлено при четырехкратной обработке растений данными препаратами, тогда как минимальное, как, впрочем, и дубильных веществ, – в контрольном варианте опыта. При этом наименьшее содержание гидроксикоричных кислот установлено при использовании химического препарата *Беллис*.

Заключение. В результате исследования влияния фунгицидных препаратов – химического *Беллис* и бактериальных *ХелсБеррина* и *ХелсБеррина*, в сочетании с *Гуматом калия* при дву- и четырехкратных обработках растений на содержание гидроксикоричных кислот, пектиновых и дубильных веществ в плодах голубики высокорослой в рамках двух полевых экспериментов с идентичной шестивариантной схемой, но при разном уровне плодородия почвы: менее высоком – на экспериментальной базе Центрального ботанического сада НАН Беларуси (ЭБ) и более высоком – расположенному на 10 км севернее крестьянско-фермерском хозяйстве «Ягодное лукошко» (КФК), установлено следующее.

В полевом опыте на ЭБ большинство испытываемых агроприемов обусловливали активизацию накопления гидроксикирничных кислот на 12–50 % относительно контроля, наибольшую на фоне обработок растений ХелсБеррином в сочетании с Гуматом калия, тогда как в эксперименте на территории КФХ наблюдалась противоположная картина, указывавшая на обеднение ими плодов голубики на 13–16 %. В обоих экспериментах под действием испытываемых фунгицидов выявлены однотипные тенденции в активизации биосинтеза пектиновых и дубильных веществ на 3–15 и 9–23 % на территории ЭБ и на 6–17 и 6–16 % – в КФХ.

Позитивное действие испытываемых препаратов на совокупность исследуемых биохимических характеристик в опыте на менее плодородной почве на ЭБ 2–4 раза превышало таковое на более плодородном субстрате в КФХ при наибольшей результативности применения ХелсБеррина в сочетании с Гуматом калия – четырехкратного в первом случае и двукратного во втором.

Список использованных источников

- Марсов, Н. Г. Фитохимическое изучение и биологическая активность брусники, клюквы и черники : автореф. дис. ... канд. фармацевт. наук / Н. Г. Марсов. – Пермь, 2006. – С. 99–101.
- Ермакова, А. И. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермакова. – 3-е изд. – Л. : Агропромиздат, 1987. – 430 с.
- Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье // Государственная фармакопея СССР. – М. : Медицина, 1987. – Вып. 1 : Общие методы анализа. – С. 286–287.

References

- Marsov N. G. *Fitokhimicheskoye izuchenie i biologicheskaya aktivnost' brusniki, klyukvy i cherniki: avtoref. dis. ... kand. farmatsevt. nauk* [Phytochemical study and biological activity of lingonberries, cranberries and blueberries]. Dr. pharmacist. sci. diss. abstract]. Perm', 2006, pp. 99–101. (in Russian)
- Ermakova A. I. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants]. 3rd ed. Leningrad, Agropromizdat Publ., 1987, 430 p. (in Russian)
- Opredeleniye soderzhaniya dubil'nykh veshchestv v lekarstvennom rastitel'nom syr'ye* [Determination of the content of tannins in medicinal plant materials]. Gosudarstvennaya farmakopeya SSSR = State Pharmacopoeia of the USSR. Moscow, Medicine Publ., 1987, iss. 1, General methods of analysis, pp. 286–287. (in Russian)

Информация об авторах

Рупасова Жанна Александровна – член-корреспондент, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией химии растений, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Криницкая Наталья Болеславовна – научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: vasileuskaya@cbg.org.by

Сулим Дарья Олеговна – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: vasileuskaya@cbg.org.by

Добрянская Ксения Андреевна – младший научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: vasileuskaya@cbg.org.by

Information about the authors

Zhanna A. Rupasova – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Lab of Plant Chemistry, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Natalya B. Krinitskaya – Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: vasileuskaya@cbg.org.by

Daria O. Sulim – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: vasileukaya@cbg.org.by

Ksenia A. Dobryanskaya – Junior Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: vasileuskaya@cbg.org.by

Задаля Виктория Сергеевна – научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: zada.93@mail.ru

Павловский Николай Болеславович – заведующий лабораторией интродукции и технологии ягодных растений, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Павловская Алла Генриховна – научный сотрудник, ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларусь» (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Коломиец Эмилия Ивановна – академик, доктор биологических наук, генеральный директор ГНПО «Химический синтез», директор, заведующий лабораторией средств биологического контроля Института микробиологии НАН Беларусь (ул. Академика Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь). E-mail: kolomiets@mbio.bas-net.by

Алещенкова Зинаида Михайловна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларусь (ул. Академика Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

Мандрик-Литвинкович Марина Николаевна – доктор биологических наук, заведующий лабораторией молекулярной диагностики и биологического контроля фитопатогенных микроорганизмов, Институт микробиологии НАН Беларусь (ул. Академика Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

Лиштван Иван Иванович – академик, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Victoria S. Zadalia – Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: zada.93@mail.ru

Nikolai B. Pavlovsky – Ph. D. (Biology), Head of the Lab of introduction and technology of berry plants, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Alla G. Pavlovskaya – Researcher, State Scientific Institution "Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus" (Surganova Str., 2v, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Emilia I. Kolomiets – Academician, D. Sc. (Biology), Director General of SNPO "Chemical Synthesis", Director, Head of the Lab of Biological Control Means of the Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (Academika Kuprevicha Str., 2, 220141, Minsk, Belarus). E-mail: kolomiets@mbio.bas-net.by

Zinaida M. Aleshchenkova – D. Sc. (Biology), Chief Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (Academika Kuprevicha Str., 2, 220141, Minsk, Belarus). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

Marina N. Mandrik-Litvinkovich – D. Sc. (Biology), Head of the Lab of molecular diagnostics and biological control of phytopathogenic microorganisms, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (Academika Kuprevicha Str., 2, 220141, Minsk, Belarus). E-mail: aleschenkova@mbio.bas-net.by

Ivan I. Lishtvan – Academician, D. Sc. (Technical), 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

ПАМЯТИ УЧЕНОГО
IN THE MEMORY OF A SCIENTIST

ПАМЯТИ АКАДЕМИКА
ИВАНА ИВАНОВИЧА ЛИШТВАНА
IN THE MEMORY OF ACADEMICIAN
IVAN IVANOVICH LISHTVAN



17 февраля 2023 г. на 91 году ушел из жизни почетный директор Института природопользования НАН Беларуси, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Иван Иванович Лиштван.

И. И. Лиштван родился 3 ноября 1932 г. в деревне Большая Дайнова Воложинского района Минской области. В 1956 г. окончил с отличием торфяной факультет Белорусского политехнического института и был направлен по распределению на торфопредприятие «Березинское» Молодечненского района Минской области, где работал на инженерных должностях. В 1958 г. он поступил в целевую аспирантуру при кафедре физики Московского торфяного института, где его научным руководителем был известный физик-реолог профессор М. П. Воларович. Одновременно с обучением в аспирантуре Иван Иванович прослушал курс коллоидной химии при одноименной кафедре Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова под руководством академика П. А. Ребиндера.

В 1961 г. И. И. Лиштван успешно защитил кандидатскую, а в 1969 г. докторскую диссертацию. В 1971 г. ему было присвоено звание профессора. В 1973 г. Иван Иванович был приглашен в Академию наук БССР на должность директора Института торфа, что положило начало новому и наиболее яркому этапу его научной и организаторской деятельности. Здесь он создал лабораторию физико-химической механики природных дисперсных систем (ФХМПДС), бессменным руководителем которой являлся до последних дней жизни.

За период своей деятельности в Институте природопользования НАН Беларуси И. И. Лиштван благодаря сотрудничеству с ведущими учеными России, Украины, Молдавии и других республик создал школу физико-химической механики и процессов тепло- и массопереноса в органогенных природных средах.

По инициативе Ивана Ивановича лаборатория ФХМПДС начала интенсивно развивать новое для Беларуси направление в области физико-химической механики, а также тепло- и массопереноса в промерзающих горных породах. В указанном направлении были защищены 1 докторская и 5 кандидатских диссертаций. В течение последних 15 лет наработки лаборатории в области исследования теплофизических и деформационно-прочностных характеристик мерзлых горных пород использованы для обоснования проектов проходки шахтных стволов калийных рудников с применением искусственного замораживания. Лабораторией ФХМПДС выполнены соответствующие договорные работы для строительства девяти новых калийных рудников (в Беларусь – 5, России – 2, Туркмении – 1, Таиланде – 1). Координация и непосредственное участие И. И. Лиштвана в исследованиях переноса растворенных минеральных солей и их комплексов с тяжелыми металлами позволили разработать материалы природоохранного назначения, показавшие высокую эффективность в решении проблем охраны окружающей среды как в Республике Беларусь, так и за рубежом.

Опыт работы, полученный Иваном Ивановичем в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова в области радиохимии, пригодился при организации научных исследований, изучающих процессы переноса радиоактивных загрязнений в торфяно-болотных почвах, и позволил

лаборатории ФХМПДС в 1986–2003 гг. принять активное участие в работах, направленных на минимизацию последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС с выездом на загрязненные радионуклидами территории Республики Беларусь.

Академик И. И. Лиштван широко известен в нашей стране и за рубежом как крупный ученый в области коллоидной химии и физико-химической механики природных дисперсных систем, природопользования, охраны окружающей среды и экологии. Под его руководством и при непосредственном участии выполнены важнейшие работы по физикохимии торфа, гуминовых веществ, битумов и биологически активных соединений. Большое научное и практическое значение имеют работы Ивана Ивановича в области ионного обмена, гидрофильтрности, тепломассопереноса и реологии органогенных природных дисперсных материалов при положительных и отрицательных температурах. Он впервые предложил и обосновал факторы, определяющие структуру торфа как сложной многокомпонентной полуколлоидно-высокомолекулярной системы с признаками полиэлектролитов и микромозаичной гетерогенности, а также возможность применения сапропелей в технологии геологоразведочного и промыслового бурения скважин.

Под руководством И. И. Лиштвана выяснены и получены принципиально важные закономерности механизма трансформации молекулярных фрагментов, миграционной и сорбционной активности гуминовых веществ в модельных и природных средах, а также их воздействия на процессы структурообразования в реологических системах.

Следует отметить организаторский талант Ивана Ивановича, позволивший в кратчайшее время занять ведущие позиции в области изучения реологически сложных природных систем как лаборатории ФХМПДС в частности, так и Институту природопользования в целом.

Академик И. И. Лиштван являлся сопредседателем комиссии Парламентского собрания Союза Беларуси и России по вопросам экологии, природопользования и ликвидации последствий аварий, иностранным членом Польской академии наук, Горной академии наук России, почетным членом Международного торфяного общества, почетным профессором ряда университетов, председателем и членом советов по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте природопользования НАН Беларуси, Институте общей и неорганической химии НАН Беларуси, Тверском государственном техническом университете, членом бюро научного совета Российской академии наук по коллоидной химии, физико-химической механике и химии твердого топлива, главным редактором журнала «Природные ресурсы», членом редколлегий журналов «Известия НАН Беларуси. Серия химических наук», «Коллоидный журнал», «Химия твердого топлива», «Химия в интересах устойчивого развития», «Промышленная безопасность», «Торф и бизнес», «Химия и технология воды», «Энергетическая стратегия», «Энергоэффективность».

Иван Иванович является автором более 1300 научных работ, в том числе 54 монографий, брошюр, учебных пособий. Им получено 98 авторских свидетельств и патентов.

Академиком подготовлены 7 докторов и 45 кандидатов наук.

Светлая память об известном ученом и прекрасном человеке Иване Ивановиче Лиштване останется в наших сердцах.

**Редколлегия журнала «Природопользование»,
сотрудники Института природопользования НАН Беларуси**

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Природопользование» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию на белорусском или русском языках; шрифт – Arial, кегль – 10 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – одинарный. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

инициалы и фамилии авторов;

название статьи;

полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Затем метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен составлять 10–16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки, число которых не должно превышать 10. Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисуночные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – русском (белорусском) и английском.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитированная литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

7. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падяка»), «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 присыпается по электронной почте в редакцию журнала – info@nature-nas.by. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType.

Правила оформления статьи:

параметры страницы – формат А4; поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см (**страницы не нумеровать!**);

текст набирается шрифтом Arial, кегль 10;

межстрочный интервал – одинарный;

абзацный отступ – 10 мм.

Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C², C₄) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать курсивом, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, C₁) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word) после первого упоминания о них, а также даются в виде отдельных файлов в графическом формате (300 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статье, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно предоставлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде. **Таблицы** должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы. Следует **различать дефис «-» и тире «—»**. В тексте тире отделяется единичными пробелами, между цифрами и числами тире ставится без пробелов.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редакцией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редакции.

Материалы для публикации следует направлять по адресу: ул. Ф. Скорины, 10, комн. 202, редакция журнала «Природопользование», 220076, г. Минск, Республика Беларусь, либо по электронной почте: eco@nature-nas.by. Тел. для справок: +375 17 325 84 55.

Научное издание
Scientific publication

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
NATURE MANAGEMENT

№ 1, 2023

Редактор Н. Т. Гавриленко
Editor N. T. Gavrilenko

Компьютерная верстка Т. Н. Козловская
Computer page making T. N. Kozlovskaya

Переводчик М. Ю. Кравченко
Translator M. U. Kravchenko

Подписано в печать 14.06.2023. *Signed into print 14.06.2023.*
Формат 60×90/8. Бумага офсетная. *60×90/8 format. Office paper.*
Гарнитура Ариал. Печать цифровая. *Arial garniture. Digital print.*
Усл. печ. л. 26,3. *Conditional printed sheets 26,3.*
Уч.-изд. л. 25,7. *Conditional edited sheets 25,7.*
Тираж 100 экз. *Circulation 100 copies.*
Заказ № 237. *Order No. 237.*

Полиграфическое исполнение
Республиканское унитарное предприятие
«Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов
Республики Беларусь».
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014 г.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск

Polygraph execution
Republican unitary enterprise
«Information and Computer Centre
of the Ministry of Finance
of the Republic of Belarus».
Press licence No. 02330/89 of 3 March 2014.
Kalvarijskaya Str. 17, 220004, Minsk