

ISSN 1810-9810

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ

NATURAL RESOURCES

**№ 2
2024**

Научное издание
SCIENTIFIC EDITION

Национальная академия наук Беларуси
Министерство природных ресурсов и охраны
окружающей среды Республики Беларусь
National Academy of Sciences of Belarus
Ministry of Natural Resources and Environmental
Protection of the Republic of Belarus

Навуковы часопіс
«ПРЫРОДНЫЯ РЭСУРСЫ»
Выдаецца з 1996 года
Выходзіць 2 разы ў год
Снежань 2024 г.

Заснавальнікі:
Нацыянальная акадэмія навук Беларусі
Міністэрства прыродных рэсурсаў
і аховы навакольнага асяроддзя
Рэспублікі Беларусь

Галоўны рэдактар
Алег Юр'евіч Баранаў

Рэдакцыйная калегія:
М. Я. Нікіфараў (намеснік галоўнага рэдактара),
С. А. Лысенка (намеснік галоўнага рэдактара),
Н. І. Мініч (вядучы рэдактар),
М. П. Аношка, У. М. Байчораў, С. У. Буга,
І. В. Войтаў, С. Я. Галаваты, М. Р. Гермянчук,
С. У. Дзямідава, С. А. Дубянок, М. А. Ерэсько,
А. І. Кавалевіч, М. В. Клебановіч, В. В. Лапа,
А. А. Махнач, А. В. Нявераў, Ф. І. Прывалаў,
А. В. Пугачэўскі, В. П. Сяменчанка, У. І. Торчык,
В. С. Хоміч, У. У. Ціток, А. І. Чайкоўскі

Адрас рэдакцыі:
вул. Акадэмічная, 1, к. 119,
220072, г. Мінск
Тэл. +375 17 272 19 19.
E-mail: prirod_res@mail.ru
Сайт: priroda.belnauka.by

Падпісныя індэксы:
ведамасны **012762**
індывідуальны **01276**

Камп'ютарная вёрстка М. Э. Юрэня
Падпісана да друку 09.12.2024 г.
Фармат 60×84 1/8. Папера афсетная. Друк лічбавы.
Ум. друк. л. 10,23. Ул.-выд. л. 11,3.
Наклад 60 экз. Заказ 255.
Кошт: індывідуальная падпіска – 23,17 руб.,
ведамасная падпіска – 23,60 руб.

Выдавец і паліграфічнае выкананне:
Рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства
«Выдавецкі дом «Беларуская навука».
Пасведчанні аб ДРВВРДВ № 1/18 ад 02.08.2013,
№ 2/196 ад 05.04.2017, ЛП № 02330/455 ад 30.12.2013.
Вул. Ф. Скарыны, 40, 220084, г. Мінск.

Scientific Journal
“NATURAL RESOURCES”
Published since 1996
Issued twice a year
December 2024

Founders:
National Academy of Sciences of Belarus
Ministry of Natural Resources
and Environmental Protection
of the Republic of Belarus

Editor-in-Chief
Oleg Yurievich Baranov

Editorial board:
M. Ye. Nikiforov (Associate Editor-in-Chief),
S. A. Lysenko (Associate Editor-in-Chief),
N. I. Minich (Lead Editor),
M. P. Anoshka, V. M. Baichorov, S. V. Buga,
I. V. Voitov, S. E. Golovaty, M. G. Germenchuk,
S. V. Demidova, S. A. Dubenok, M. A. Yeresko,
A. I. Kovalevich, M. V. Klebanovich, V. V. Lapa,
A. A. Makhnach, A. V. Neverov, F. I. Pryvalov,
A. V. Pugachevskii, V. P. Semenchenko, V. I. Torchik,
V. S. Khomich, V. V. Titok, A. I. Tchaikovskiy

Address of editorial office:
1, Akademicheskaya Str., room 119,
220072, Minsk, Republic of Belarus.
Phone: 375 17 272 19 19
E-mail: prirod_res@mail.ru
Website: priroda.belnauka.by

Subscription indices:
departmental **012762**
individual **01276**

Computer imposition M. E. Yurenia
Signed for publication December 09, 2024
Format 60×84 1/8. Offset paper. Seal digital.
Related press sheet 10,23. Publisher's signatures 11,3.
Circulation 60 copies. Order 255.
Price: individual subscription – 23,17 BYN,
departmental subscription – 23,60 BYN.

Publisher and printing:
Republican Unitary Enterprise
“Publishing house “Belarusian Navuka”.
Certificates by SRPMDPE N 1/18 on 08.02.2013,
N 2/196 on 04.05.2017, LP N 02330/455 on 12.30.2013.
40, F. Skorina Str. , 220084, Minsk

СОДЕРЖАНИЕ

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Бровка Ю. А. Особенности атмосферного увлажнения на территории Беларуси в летний период при современном изменении климата.	5
Лысенко С. А., Хитриков М. А. Оценки современных изменений биоклиматических параметров почвенно-растительного покрова Гомельской области.	17

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Адамович Б. В., Михеева Т. М., Ковалевская Р. З., Жукова Т. В., Дубко Н. В., Верес Ю. К. Трофический статус озерных экосистем и его связь с основными гидроэкологическими характеристиками водоемов (на примере озер Нарочанского региона, Беларусь).	30
Ковалевич А. И., Кончиц А. П., Сачек А. П. Эколого-климатические факторы снижения устойчивости хвойных пород Беларуси.	40
Латышев С. Э. Сезонная динамика развития <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin Ex Steud. в озерах Будовесь и Лесковичи (Белорусское Поозерье).	47
Сакович А. А., Малько М. С. Особенности таксономического состава и структуры бриофлоры Полесского региона.	55
Сушко Г. Г., Лакотко А. А., Хохлова О. И., Ткачёнок А. С., Яновская В. В., Литвенкова И. А. Изменчивость разнообразия ассамблей жужелиц (Insecta, Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных (<i>Pinetum myrtillosum</i>) в Белорусском Поозерье.	62
Шавалда Е. С., Судник А. В., Юшин Н. С., Зиньковская И. И. Структура придорожных травянистых сообществ в условиях загрязненности почв тяжелыми металлами.	68

ПОЧВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

Чайковский А. И., Максименков М. В., Кудин М. В., Богданович И. А., Терещенко С. С., Гигиняк И. Ю., Журавлёв Д. В. К опыту проведения экологической реабилитации нарушенных торфяников в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике.	78
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Ламан Н. А., Николайчук А. М. Результативность экспертизы проектов, поступивших в Государственный экспертный совет № 10 «Природопользование и экология» в 2019–2023 годах.	83
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CLIMATIC RESOURCES

SOIL AND LAND RESOURCES

Brovka Yu. A. Features of atmospheric humidification on the territory of Belarus in summer under modern climate change

Lysenko S. A., Khitrykau M. A. Estimation of modern changes in the bioclimatic characteristics of the soil and plant cover of the Homiel region.

BIOLOGICAL RESOURCES

Adamowich B. V., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Zhukova T. V., Dubko N. V., Veres Yu. K. Trophic state of lake ecosystems and its relationship with the main hydroecological characteristics of water bodies: a case study of the lakes of Narochansky region (Belarus)

Kovalevich A. I., Konchits A. P., Sachek A. P. Ecological and climatic factors of decreasing stability of coniferous species of Belarus

Latyshau S. E. Seasonal dynamics of *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud. development in Budovest' and Leskovichi Lakes (Belarusian Lakeland)

Sakovich A. A., Mal'ko M. S. Features of the taxonomic composition and structure of bryoflora of the Polesie region.

Sushko G. G., Lakotko A. A., Khokhlova O. I., Tkachenok A. S., Yanovskaya V. V., Litvenkova I. A. Variability of diversity of carabid assemblages (Insecta, Coleoptera, Carabidae) in pine forests (*Pinetum myrtillosum*) in the Belarusian Lake District

Shavaldya Ya. S., Sudnik A. V., Yushin N. S., Ziniovskaya I. I. Structure of roadside grass communities under conditions of soil contamination with heavy metals

SOIL AND LAND RESOURCES

Chaikouski A. I., Maksimenkov M. V., Kudin M. V., Bogdanovich I. A., Tereshchenko S. S., Giginyak I. Yu., Zhuravlev D. V. On the experience of ecological rehabilitation of disturbed peatlands in the Polesie state radiation-ecological reserve.

SHORT MESSAGES

Laman N. A., Nikolaychuk A. M. Performance of examination of projects submitted to the State Expert Council no. 10 «Nature Management and Ecology» in 2019–2023

ЗМЕСТ

КЛІМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ

Броўка Ю. А. Асаблівасці атмасфернага ўвільгатнення на тэрыторыі Беларусі ў летні перыяд пры сучасным змяненні клімату.

Лысенка С. А., Хітрыкаў М. А. Ацэнкі сучасных змен біякліматычных параметраў глебава-раслінага покрыва Гомельскай вобласці.

БІЯЛАГІЧНЫЯ РЭСУРСЫ

Адамовіч Б. У., Міхеева Т. М., Кавалеўская Р. З., Жукава Т. В., Дубко М. У., Верас Ю. К. Трафічны статус азёрных экасістэм і яго сувязь з асноўнымі гідраэкалагічнымі характарыстыкамі вадаёмаў (на прыкладзе азёр Нарачанскага рэгіёна, Беларусь)

Кавалевіч А. І., Кончыц А. П., Сачок А. П. Экалага-кліматычныя фактары зніжэння стабільнасці хвойных парод Беларусі

Латышаў С. Э. Сезонная дынаміка развіцця *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud. у азёрах Будавесць і Лескавічы (Беларускае Паазер'е)

Саковіч А. А., Малько М. С. Асаблівасці таксанамічнага складу і структуры брыяфлоры Палескага рэгіёна

Сушко Г. Г., Лакотка А. А., Хахлова А. І., Ткачонак А. С., Яноўская В. У., Літвянкова І. А. Зменлівасць разнастайнасці асамблей жужаліц (Insecta, Coleoptera, Carabidae) у сасняках чарнічных (*Pinetum myrtillosum*) у Беларускім Паазер'і

Шавалда Я. С., Суднік А. У., Юшын Н. С., Зінькоўская І. І. Структура прыдарожных травяністых згуртаванняў ва ўмовах забруджанасці глеб цяжкімі металамі.

ГЛЕБАВА-ЗЬМЕЛЬНЫЯ РЭСУРСЫ

Чайкоўскі А. І., Максіменкаў М. В., Кудзін М. В., Багдановіч І. А., Цярэшчанка С. С., Гігіняк І. Ю., Жураўлёў Д. В. Да вопыту правядзення экалагічнай рэабілітацыі парушаных тарфянікаў ў Палескім дзяржаўным радыяцыйна-экалагічным запаведніку

КАРОТКІЯ ПАВЕДАМЛЕННІ

Ламан М. А., Мікалайчук А. М. Вынікі экспертызы праектаў, якія паступілі ў Дзяржаўны экспертны савет № 10 «Прыродакарыстанне і экалогія» ў 2019–2023 гадах.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

CLIMATIC RESOURCES

КЛИМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ

ISSN 1810-9810 (Print)
УДК 551.583 (476)

Ю. А. Бровка

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: brovka.yuliya@mail.ru*

ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО УВЛАЖНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПРИ СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Аннотация. В связи с использованием новых климатических норм, рассчитанных за последний 30-летний период и наиболее полно отражающих современное потепление климата, выполнена оценка атмосферного увлажнения на территории Беларуси в летние месяцы за 1991–2020 гг. с использованием гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), индекса засушливости Педя (S) и стандартизированного индекса осадков (SPI). По результатам исследования в летний период 1991–2020 гг. на большей части Беларуси отмечено достаточное увлажнение по ГТК, слабозасушливые условия по SPI, на половине территории – слабая засуха по S. По всем рассмотренным индексам атмосферного увлажнения слабозасушливые условия сформировались в августе в южной и центральной широтных зонах Беларуси. Определена повторяемость засушливых и избыточно влажных условий по гидротермическому коэффициенту в летние месяцы в период потепления климата. Наибольшей засушливостью отличается август: на половине территории страны повторяемость атмосферной засухи составляет 30–50 %. Избыточное увлажнение чаще всего отмечается в июле, когда на большей части территории повторяемость избыточного увлажнения составляет 40–70 %. По сравнению с периодом 1961–1990 гг. повторяемость атмосферных засух максимально увеличивается в августе в Брестской и Гродненской обл. (на 16–17 %). Повторяемость избыточного атмосферного увлажнения значительно снижается в июне в Гродненской, Минской и Могилевской обл. (на 14–19%), в августе – во всех (на 12–17%), кроме Витебской. Выполнены прогнозные оценки изменения гидротермического коэффициента в областях Беларуси в последующий 30-летний период при различных сценариях выбросов парниковых газов. Увлажнение уменьшится от оптимальных до слабозасушливых условий в июле; в августе сохранятся слабозасушливые условия или сформируются засушливые условия в южных областях; в июне условия увлажнения не изменятся и будут оптимальными.

Ключевые слова: изменение климата, индексы атмосферного увлажнения, засуха, избыточное увлажнение

Yu. A. Brovka

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: brovka.yuliya@mail.ru*

FEATURES OF ATMOSPHERIC HUMIDIFICATION ON THE TERRITORY OF BELARUS IN SUMMER UNDER MODERN CLIMATE CHANGE

Abstract. Due to implementation of new climatic norms calculated for the last 30-year period, that most fully reflect the present-day climate warming, an assessment of atmospheric humidification in the territory of Belarus in the summer months for 1991–2020 has been carried out using the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC), the Ped' aridity index (S) and the standardized precipitation index (SPI). According to the results of the study, in the summer period 1991–2020 most of the territory of Belarus was characterized by sufficient humidity levels according to HTC, slightly dry conditions according to SPI, and in half of the territory there was a slight drought according to S. All considered indices of atmospheric humidity indicate the formation of slightly arid conditions formed in August in the southern and central latitudinal zones of Belarus. The recurrence of dry and excessively humid conditions by the hydrothermal coefficient during summer months in the period of climate warming was determined. August is characterised by the most significant aridity: in half of the country's territory the recurrence of atmospheric drought is 30–50 %. Excessive humidity is most often observed in July, when in most parts of the territory the recurrence of excessive humidity is 40–70 %. Compared to the period 1961–1990, the recurrence of atmospheric droughts is maximally increases in August in Brest and Grodno regions (by 16–17 %). The recurrence of excessive atmospheric moisture significantly decreases in June in Grodno, Minsk and Mogilev regions (by 14–19 %), in August – in all regions but Vitebsk (by 12–17 %). Forecast estimations of changes in the hydrothermal coefficient in the regions of Belarus in the subsequent 30-year period under different scenarios of greenhouse gas emissions have been carried out. Humidification will decrease from optimal to slightly dry conditions in July, slightly dry conditions will persist in August or dry conditions will form in southern regions, in June humidification conditions will not change and will be optimal.

Keywords: climate change, atmospheric moisture indices, drought, excess humidity

Ю. А. Броўка

*Институт прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: brovka.yuliya@mail.ru*

АСАБЛІВАСЦІ АТМАСФЕРНАГА ЎВІЛЬГАТНЕННЯ НА ТЭРЫТОРЫІ БЕЛАРУСІ Ў ЛЕТНІ ПЕРЫЯД ПРЫ СУЧАСНЫМ ЗМЯНЕННІ КЛІМАТУ

Анотацыя. У сувязі з выкарыстаннем новых кліматычных норм, якія разлічаны за апошні 30-гадовы перыяд і найбольш поўна адлюстроўваюць сучаснае пацяпленне клімату, выканана ацэнка атмасфернага ўвільгатнення на тэрыторыі Беларусі ў летнія месяцы за 1991–2020 гг. з выкарыстаннем гідратэрмічнага каэфіцыента Селянінава (ГТК), індэкса засушлівасці Педзя (S) і стандартызаванага індэкса ападкаў (SPI). Па выніках даследавання ў летні перыяд 1991–2020 гг. на большай частцы Беларусі адзначана дастатковае ўвільгатненне па ГТК, слабазасушлівыя ўмовы па SPI, на палове тэрыторыі – слабая засуха па S. Па ўсіх разгледжаных індэксах атмасфернага ўвільгатнення слабазасушлівыя ўмовы сфарміраваліся ў жніўні ў паўднёвай і цэнтральнай шыротных зонах Беларусі. Вызначана паўтаральнасць засушлівых і залішне вільготных умоў па гідратэрмічным каэфіцыенте ў летнія месяцы ў перыяд пацяплення клімату. Найбольшай засушлівасцю адрозніваецца жніўне: на палове тэрыторыі краіны паўтаральнасць атмасфернай засухі складае 30–50 %. Залішняе ўвільгатненне часцей за ўсё адзначаецца ў ліпені, калі на большай частцы тэрыторыі паўтаральнасць залішняга ўвільгатнення складае 40–70 %. У параўнанні з перыядам 1961–1990 гг. паўтаральнасць атмасферных засух максімальна павялічваецца ў жніўні ў Брэсцкай і Гродзенскай абл. (на 16–17 %). Паўтаральнасць залішняга атмасфернага ўвільгатнення значна зніжаецца ў чэрвені ў Гродзенскай, Мінскай і Магілёўскай абл. (на 14–19 %), у жніўні – ва ўсіх (на 12–17 %), акрамя Віцебскай. Выкананы прагнозы ацэнкі змянення ГТК у абласцях Беларусі ў наступны 30-гадовы перыяд пры розных сцэнарыях выкідаў парніковых газаў. Увільгатненне паменшыцца ад аптымальных да слабазасушлівых умоў у ліпені; у жніўні захаваецца слабазасушлівыя ўмовы або сфармуецца засушлівыя ўмовы ў паўднёвых абласцях; у чэрвені ўмовы ўвільгатнення не змяняцца і будуць аптымальнымі.

Ключавыя словы: змяненне клімату, індэкс атмасфернага ўвільгатнення, засуха, залішняе ўвільгатненне

Введзенне. На фоне глабальнага росту среднегодовой температуры воздуха для территории Беларуси с конца 1980-х гг. отмечается потепление климата, которое продолжается и до настоящего времени. По утверждению некоторых ученых [1], до 1990 г. отмечался быстрый рост зимней температуры, в последующие 30 лет скорость летнего потепления в 1,7 раза превышает скорость потепления зимой. С начала текущего столетия по сравнению с 1980–1999 гг. значительно увеличилась вероятность высоких среднесуточных температур летом и частоты возникновения волн тепла, их продолжительности и интенсивности. Оценка условий влагообеспеченности территории Беларуси [1] показала отрицательный баланс между среднегодовым количеством осадков и испаряемостью в южных областях в период 2000–2019 гг., тогда как в предыдущие 20 лет годовое количество осадков превышало испаряемость на всей территории страны. Это свидетельствует об увеличении засушливости климата на юге Беларуси.

Исследование изменений в режиме увлажнения на территории Беларуси [2] показало, что в 1989–2019 гг. по сравнению с уровнем 1948–1988 гг. в летний сезон отмечалось сокращение продолжительности выпадения осадков на 10–20 % (за исключением севера страны) и увеличение максимальных сумм осадков на 20–30 %, особенно на юге страны.

Увеличение засушливости в период потепления климата Беларуси подтверждается анализом повторяемости атмосферных засух с использованием стандартизированного индекса осадков [2, 3]. Выявлен рост повторяемости атмосферных засух различных градаций (экстремальная, сильная, умеренная, слабая засуха) от 2 до 26 % в апреле – октябре. На большинстве анализируемых станций увеличивается повторяемость засухи хотя бы одной из градаций. Анализ динамики стандартизированного индекса осадков в летние месяцы за период 1971–2020 гг. показал статистически значимое увеличение засушливости на западе, юго-востоке и локально в северном регионе [3]. Наибольшее снижение стандартизированного индекса осадков за отдельные месяцы отмечено в июне на большей части страны, в августе наблюдается рост засушливости на отдельных станциях юга Беларуси.

В период потепления по сравнению с 1960–1988 гг. отмечено уменьшение увлажнения по гидро-термическому коэффициенту до слабозасушливых и засушливых условий в августе на большей части территории (южнее 54° с. ш.), в июне на юго-востоке и юго-западе страны [4]. В июле наблюдалось увеличение увлажнения (избыточное увлажнение на юге и западе Беларуси).

По результатам исследований [5, 6] на территории Беларуси за период потепления 1989–2021 гг. просматривается тенденция к снижению влагозапасов в верхнем слое почвы, наиболее выраженное в Гомельской обл. Наибольшая повторяемость почвенных засух во всех областях (максимальная в Белорусском Полесье [6]) отмечена в летние месяцы. Выявлена цикличность (9–12 лет) динамики территориального охвата почвенной засухи и максимальной повторяемости засух, включая сильные [5, 6]. Результаты оценки уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к почвенным засухам представлены в работах [7, 8].

В условиях современного изменения климата как на глобальном, так и региональном уровне и с учетом рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) рассчитывать климатические нормы за последний 30-летний период в практику национальных гидрометеорологических служб, в том числе и Республики Беларусь, внедрены климатические нормы 1991–2020 гг., характеризующие период потепления климата.

В связи с этим актуальной является оценка атмосферного увлажнения и повторяемости аномальных его значений на территории Беларуси за указанный период в летние месяцы, когда наиболее выражено потепление [1].

Существует ряд показателей для оценки условий увлажнения, в том числе засух. Для европейской части России и территории бывшего Советского Союза [9] разработаны индекс засушливости Г. Н. Высоцкого, показатель засушливости П. И. Колоскова, баланс увлажнения Р. Э. Давида, гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, показатель засушливости Н. В. Бова, коэффициент увлажнения Н. Н. Иванова, показатель сухости климата В. П. Попова, радиационный индекс сухости М. И. Будыко, показатель увлажнения С. И. Костина, коэффициент увлажнения С. А. Сапожниковой, показатель влагообеспеченности А. В. Процера, показатель атмосферного увлажнения Д. И. Шашко, индекс засушливости Д. А. Педя, коэффициент увлажнения Е. С. Улановой и др. В последние три десятилетия наиболее используемыми показателями для оценки засух на сопредельных с Беларусью территориях стран СНГ являются показатели изменения температуры и осадков: ГТК Г. Т. Селянинова, индекс Д. А. Педя [10–12]. Кроме того широкое распространение получили наиболее известные за рубежом количественные показатели засухи – индекс суровости засухи Палмера (PDSI, Palmer Drought Severity Index), стандартизованный индекс осадков (SPI, Standardized Precipitation Index) и стандартизованный индекс осадков, испаряемости (SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) [10, 13–16].

В работе выполнена оценка атмосферного увлажнения на территории Беларуси в июне – августе за период новых климатических норм (1991–2020 гг.) с использованием гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (ГТК), индекса засушливости Д. А. Педя (S), стандартизованного индекса осадков SPI. Проведена пространственная оценка повторяемости аномально засушливых и влажных условий по ГТК в летние месяцы в период потепления климата, оценка изменений по сравнению с предыдущим 30-летним периодом средней для областей Беларуси повторяемости аномального атмосферного увлажнения. Сделаны прогнозные оценки изменения ГТК в областях Беларуси в последующий 30-летний период при различных сценариях выбросов парниковых газов.

Материалы и методика исследований. Для оценки атмосферного увлажнения в Беларуси, расчета повторяемости аномальных условий увлажнения (атмосферная засуха, избыточное увлажнение) на основании многолетних данных наблюдений в работе используются различные количественные показатели и критерии.

ГТК представляет собой отношение суммы осадков за определенное время к сумме активных температур выше 10 °С, уменьшенной в 10 раз за тот же промежуток (уравнение 1):

$$\text{ГТК} = \frac{R}{0,1 \sum T \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}}, \quad (1)$$

где R – сумма осадков; $0,1 \sum T \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ – сумма активных температур воздуха выше 10 °С.

При пространственно-временном анализе ГТК в работе использована градация и соответствующие характеристики условий увлажнения территории, принятые в Белгидромете [17]: более 1,6 – избыточно влажные; 1,31...1,6 – оптимальные; 1,01...1,3 – слабозасушливые; 0,71...1,0 – засушливые; 0,40...0,7 – очень засушливые; 0,21...0,39 – сухие и 0,2 и менее – очень сухие. В литературе приведены различные классификации интенсивности засух по значениям ГТК [13, 15, 18, 19]. В данной работе использованы следующие категории степени засухи, соответствующие указанным в [17] градациям ГТК: экстремальная засуха (ГТК 0,2 и менее); сильная (менее 0,4); средняя (0,4...0,7); слабая атмосферная засуха (ГТК 0,71...1,0).

Показатель засушливости Д. А. Педя (уравнение 2) учитывает аномалии (отклонение от нормы 1961–1990 гг.) температуры воздуха и осадков и их среднеквадратическое отклонение за весь исследуемый период:

$$S = \frac{\Delta T}{\sigma(T)} - \frac{\Delta R}{\sigma(R)}, \quad (2)$$

где ΔT – аномалия температуры воздуха; ΔR – аномалия суммы осадков; $\sigma(T)$ – среднеквадратическое отклонение температуры воздуха, $\sigma(R)$ – среднеквадратическое отклонение суммы осадков.

Использованы следующие градации условий увлажнения и степени засухи [10, 20, 21]: $S > 2$ – засуха; $1 < S \leq 2$ – засушливые условия; $-1 \leq S \leq 1$ – нормальные условия увлажнения; $-2 \leq S < -1$ – влажные условия; $S < -2$ – избыточное увлажнение.

Значения $1,0 < S \leq 2,0$ рассматриваются как слабая засуха; $S > 2,0$ – средняя засуха; $S > 3,0$ – сильная засуха; $S > 4,0$ – экстремальная засуха.

В 2009 г. ВМО рекомендовала использовать SPI странам в качестве основного метеорологического индекса засушливости для мониторинга и отслеживания условий засушливости [22], который рассчитывается с помощью программы SPIGenerator Национального центра по смягчению последствий засухи США (<https://drought.unl.edu/monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>). Расчет включает преобразование временных рядов месячных сумм осадков с использованием гамма-распределения и последующее нормирование полученных вероятностей.

Классификация атмосферного увлажнения по SPI [23]: -2 и менее – экстремальная, $-1,99 \dots -1,5$ – сильная, $-1,49 \dots -1$ – умеренная засуха, $-0,99 \dots 0$ – слабая засуха, $0 \dots 0,99$ – нормальное увлажнение, $1 \dots 1,49$ – умеренное увлажнение, $1,5 \dots 1,99$ – избыточное увлажнение, $2,0$ и более – экстремальное увлажнение.

В качестве исходных данных использованы результаты наблюдений за температурой воздуха и количеством осадков на 48 метеостанциях Беларуси, указанных далее на рисунках. Для построения карт пространственного распределения исследуемых индексов увлажнения использовался программный пакет ArcGis.

Результаты и их обсуждение. Выполнен анализ пространственного распределения индексов атмосферного увлажнения с июня по август и за весь летний период в соответствии с новыми климатическими нормами ВМО (1991–2020 гг.).

В летний период на большей части территории Беларуси отмечаются оптимальные условия атмосферного увлажнения по ГТК (рис. 1, а). Слабозасушливые условия сформировались в западной части Гродненской, Брестской обл., восточной половине Гомельской обл. (наименьшие значения ГТК).

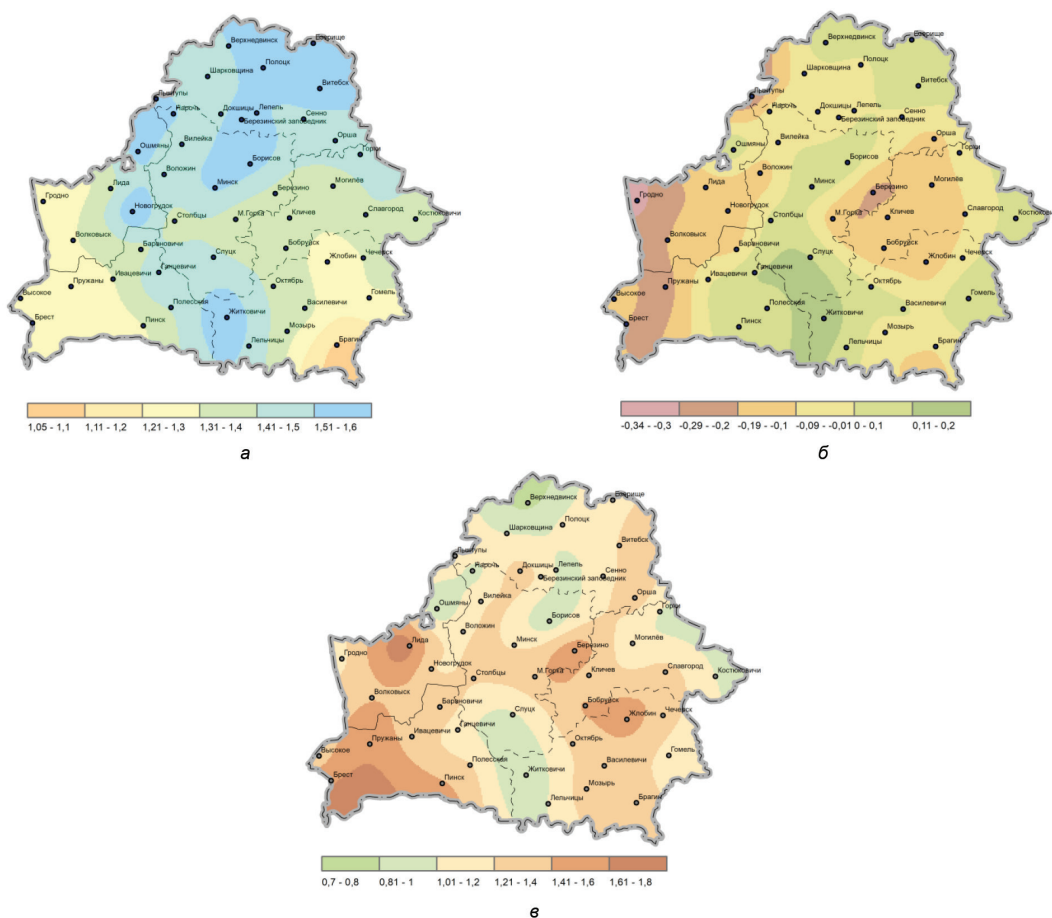


Рис. 1. Пространственное изменение средних показателей атмосферного увлажнения на территории Беларуси в июне – августе 1991–2020 гг.: а – гидротермического коэффициента Селянинова; б – стандартизированного индекса осадков, в – индекса Педя (желтым, оранжевым и коричневым цветами показаны засушливые условия)

В летний период достаточное атмосферное увлажнение по SPI сформировалось локально в разных регионах страны и наиболее распространено на юге (рис. 1, б). Для большей части территории характерна слабая засуха, наиболее выраженная (SPI от $-0,1$ до $-0,3$) в Гродненской обл., западных частях Брестской и Могилевской обл. По индексу Педя в летний период 1991–2020 гг. в сравнении с нормой 1961–1990 гг. для половины территории Беларуси отмечены засушливые условия (слабая засуха) (рис. 1, в). Индекс Педя увеличивается на юго-западе и западе.

Если рассматривать пространственное распределение ГТК в отдельные месяцы периода потепления климата, то в июне (рис. 2, а) более половины территории Беларуси характеризуется достаточным увлажнением, слабозасушливые условия занимают значительную площадь на юго-востоке, юго-западе и западе, переувлажнение отмечается преимущественно на севере Витебской обл. и локально на западе и юге страны.

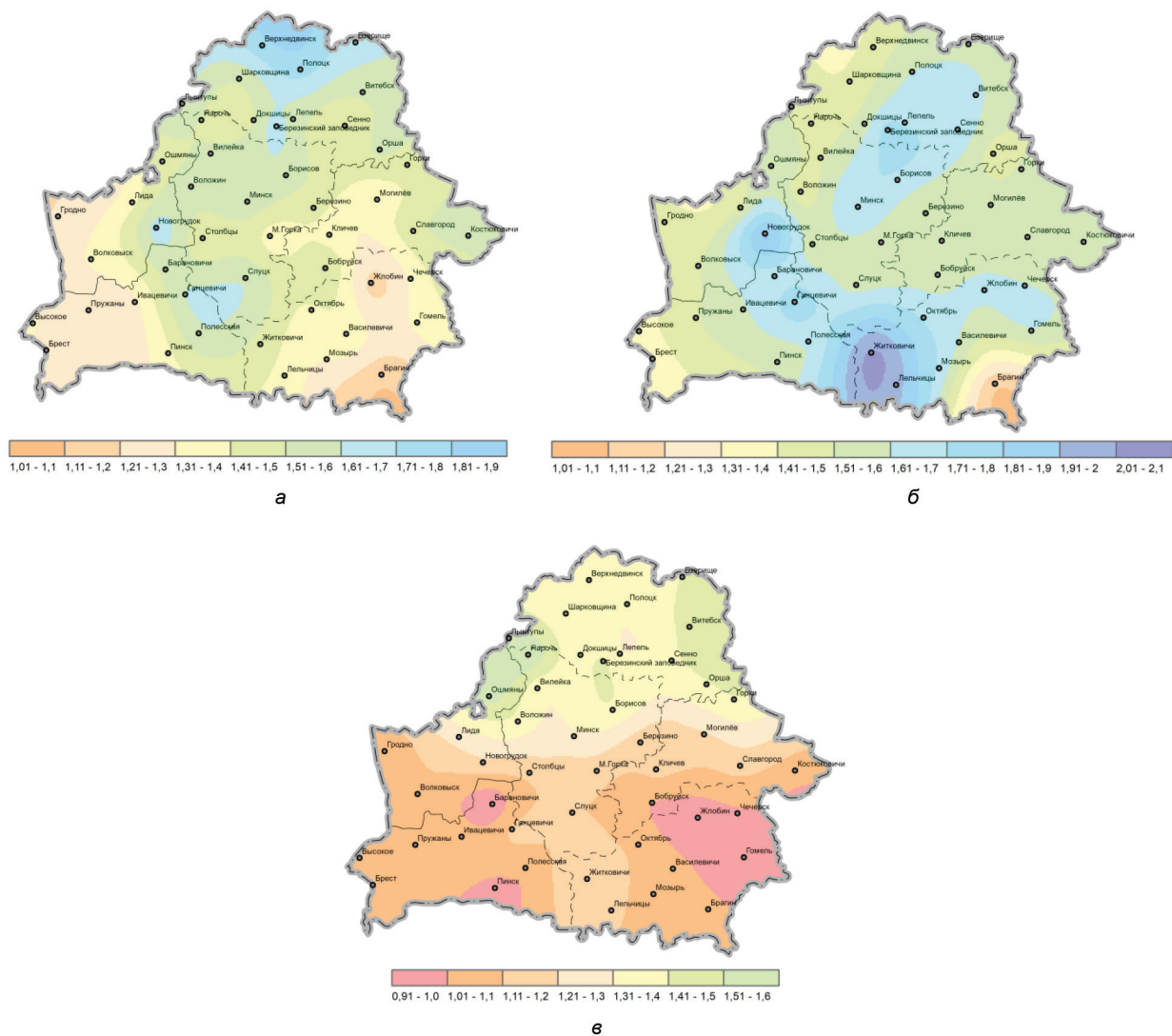


Рис. 2. Пространственное изменение гидротермического коэффициента Селянинова на территории Беларуси в летние месяцы 1991–2020 гг.

В июле (рис. 2, б) также преобладают оптимальные условия увлажнения территории, увеличивается площадь распространения избыточного увлажнения: главным образом южная часть Беларуси (на метеостанции «Житковичи» ГТК до 2,0), восток Гродненской, часть Витебской и Минской обл. На крайнем юго-востоке страны сохраняются слабозасушливые условия. Для августа (рис. 2, в) отмечаются слабозасушливые условия на большей части территории (южная и центральная широтные зоны Беларуси), на востоке и локально в Брестской обл. – слабая засуха (ГТК около 1,0). Северная часть страны характеризуется увлажнением в пределах нормы (на северо-западе ГТК до 1,6).

Пространственное изменение SPI в летние месяцы представлено на рис. 3. В июне на большей части территории Беларуси наблюдаются слабозасушливые условия, наиболее выраженные в западной и юго-западной ее частях (SPI до $-0,35$), локально на востоке, юге и севере Беларуси отмечается нормальное атмосферное увлажнение (см. рис. 3, а). В июле территориально преобладает достаточное увлажнение, только на северо-востоке, северо-западе и западе сформировалась слабая засуха по SPI (см. рис. 3, б). В августе она охватывает всю территорию Беларуси, наименьшие значения SPI ($-0,2...-0,4$) отмечаются в южной и центральной ее полосе (см. рис. 3, в).

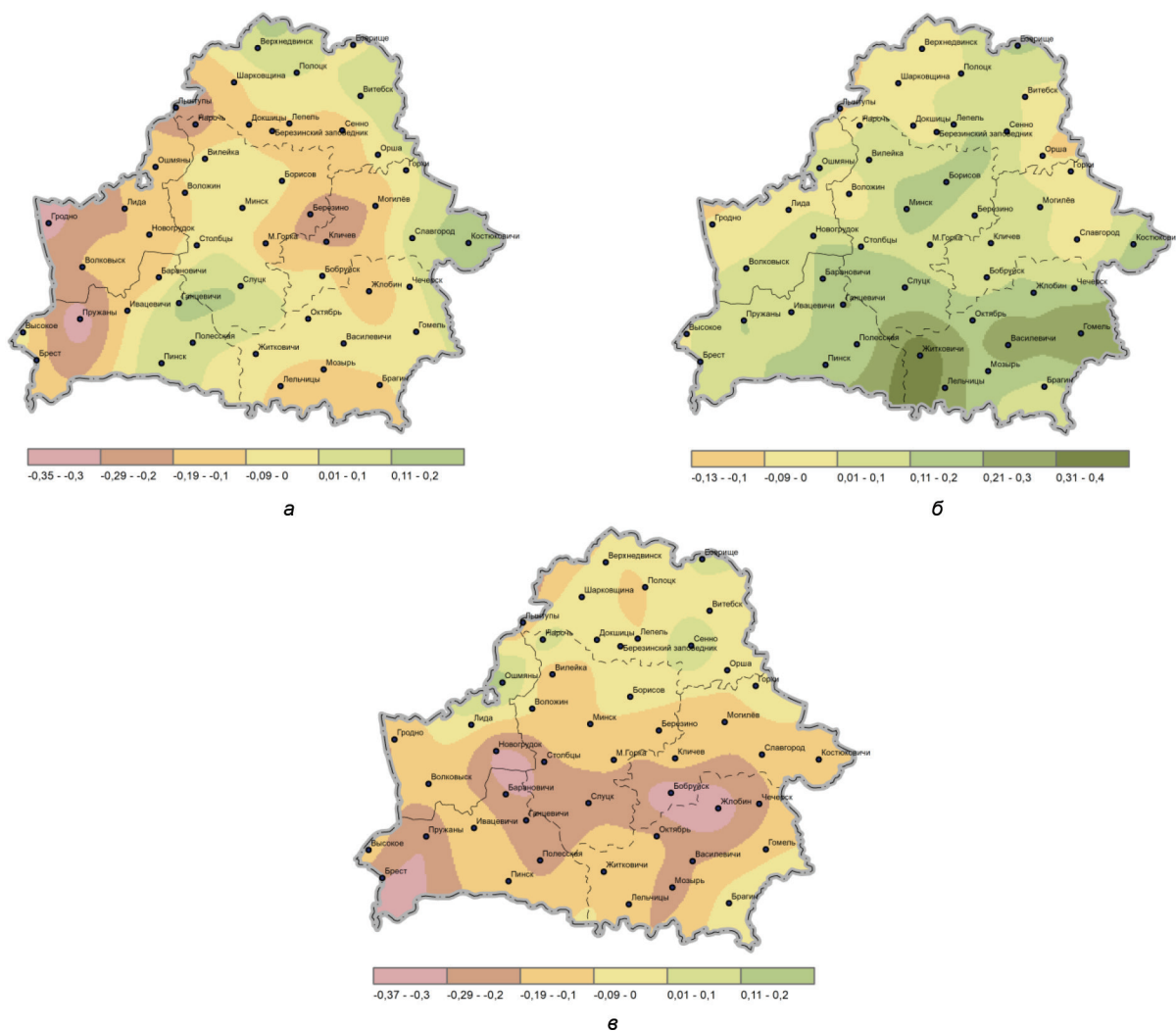


Рис. 3. Пространственное изменение стандартизированного индекса осадков на территории Беларуси в летние месяцы 1991–2020 гг. (зеленым цветом показано нормальное увлажнение, желтым и коричневым – слабая засуха)

По индексу Педя в июне (рис. 4, а) и июле (рис. 4, б) почти на всей территории наблюдаются нормальные условия увлажнения с положительными значениями S , локально на юге, а в июле и на северо-востоке сформировались засушливые условия. На большей части территории Беларуси, главным образом в южной и центральной широтных областях, засушливые условия получили распространение в августе (рис. 4, в).

Следует отметить, что приведенные выше результаты дают осредненную за 1991–2020 гг. оценку атмосферного увлажнения в летний период на территории Беларуси, хотя в отдельные годы на большей части территории страны в один или несколько летних месяцев отмечалось избыточное увлажнение (1993, 1997, 1998, 2000, 2006, 2007 (июль), 2009, 2012, 2018 (июль) гг.) или атмосферная засуха (1992, 1994, 1995, 1996, 1999, 2002, 2007 (август), 2010, 2013, 2015, 2018 (август), 2019 гг.).

В летние месяцы, особенно в августе, отмечаются статистически значимые коэффициенты пространственной корреляции между индексами (таблица).

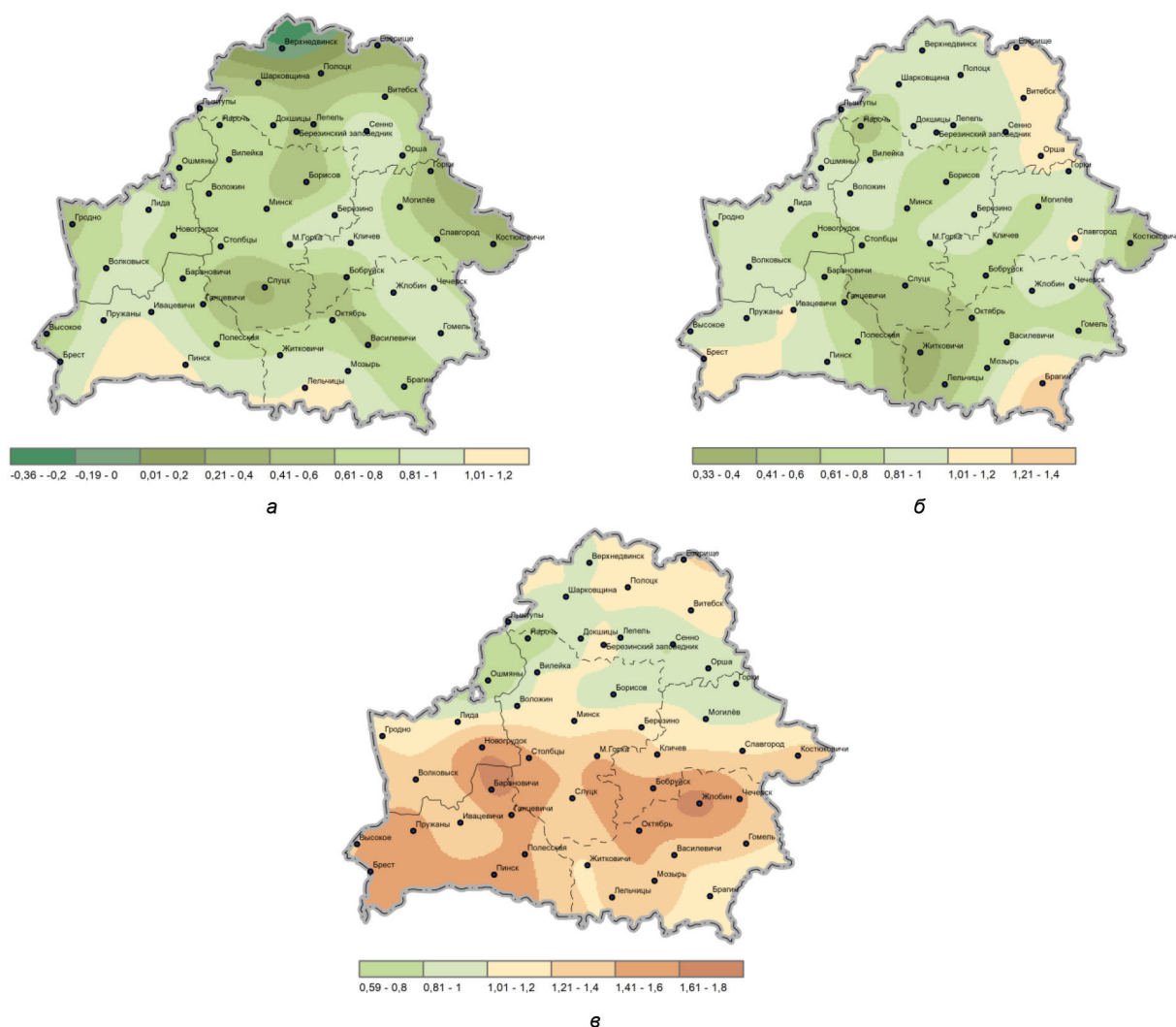


Рис. 4. Пространственное изменение индекса засушливости Педя на территории Беларуси в летние месяцы 1991–2020 гг. (зеленым цветом показаны нормальные условия увлажнения, коричневым – засушливые)

Коэффициенты пространственной корреляции (*r*) индексов атмосферного увлажнения в летние месяцы 1991–2020 гг.

Индексы	Месяц		
	июнь	июль	август
ГТК–S	-0,61	-0,64	-0,85
ГТК–SPI	0,47	0,54	0,72
S–SPI	-0,41	-0,61	-0,86

Примечание. Шрифтом показаны статистически значимые коэффициенты парной корреляции ($r \geq 0,35$ при уровне значимости $\alpha = 0,01$).

Оценка изменения повторяемости атмосферной засухи по ГТК (0,7 и менее) и избыточного увлажнения (более 1,6) с июня по август за период 1991–2020 гг. показала следующие результаты (рис. 5, а, б).

В период современного потепления климата (1991–2020 гг.) повторяемость июньских засух увеличивается на юго-востоке страны до максимальных значений (28–42 %), а также на локальных территориях на западе, северо-западе, юге Беларуси (21–28 %). В июле частота засух возрастает в западной половине страны, локально на северо-востоке и юго-востоке и составляет от 21 до 28–33 %. В августе, самом засушливом месяце, примерно для половины территории Беларуси (южная и центральная широтные зоны и северо-восток страны) повторяемость атмосферной засухи составляет 30–50 %, максимальные значения отмечаются преимущественно на юго-востоке, западе Беларуси.

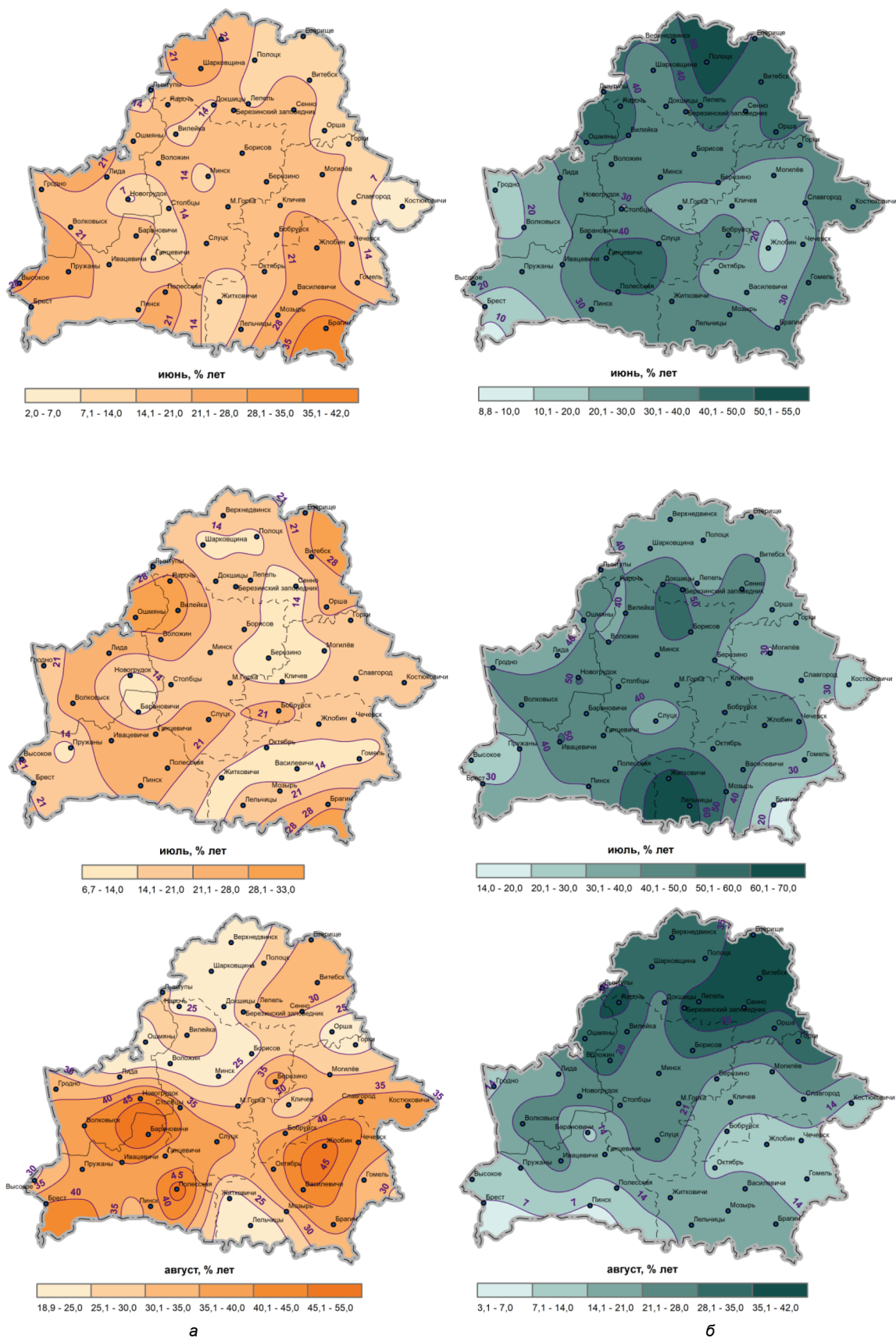


Рис. 5. Пространственное изменение повторяемости атмосферных засух (а) и избыточного атмосферного увлажнения (б) в период потепления климата 1991–2020 гг.

Избыточное атмосферное увлажнение в период потепления климата чаще отмечается в июле (см. рис. 5, б). На большей части территории повторяемость избыточного увлажнения в июле составляет 40–70 %, максимальные ее значения наблюдаются на юге Беларуси (метеостанция «Житковичи»). Избыточное увлажнение в июне и особенно в августе на большей части Беларуси отмечается реже. Наибольшая его повторяемость выявлена на севере и локально на Полесье в июне (40–55 %) и на северо-востоке страны в августе (35–42 %).

Выполнена оценка изменений средней для областей Беларуси повторяемости аномального атмосферного увлажнения в июне – августе в 1991–2020 гг. по сравнению с предыдущим 30-летним периодом (рис. 6).

Увеличение повторяемости атмосферных засух во всех областях выявлено в августе (наибольшее в Брестской и Гродненской обл. – на 16–17 %) и июне (максимальное на юге страны – на 9–10 %). Повторяемость атмосферных засух в июле увеличилась на 6–7 % в большинстве областей и почти не изменилась в Гомельской и Гродненской обл. Повторяемость избыточного атмосферного увлажнения возросла в июле во многих областях (максимально в Брестской обл. – на 10 %), несколько уменьшился показатель в Могилевской обл. Снижение повторяемости высокого увлажнения отмечено в июне на всей территории страны, наиболее значительное – в Могилевской обл. (на 19 %), в Минской и Гродненской обл. (на 15–16 %). Существенно уменьшается повторяемость (на 12–17 %) избыточного атмосферного увлажнения в августе во всех регионах, кроме Витебской обл.

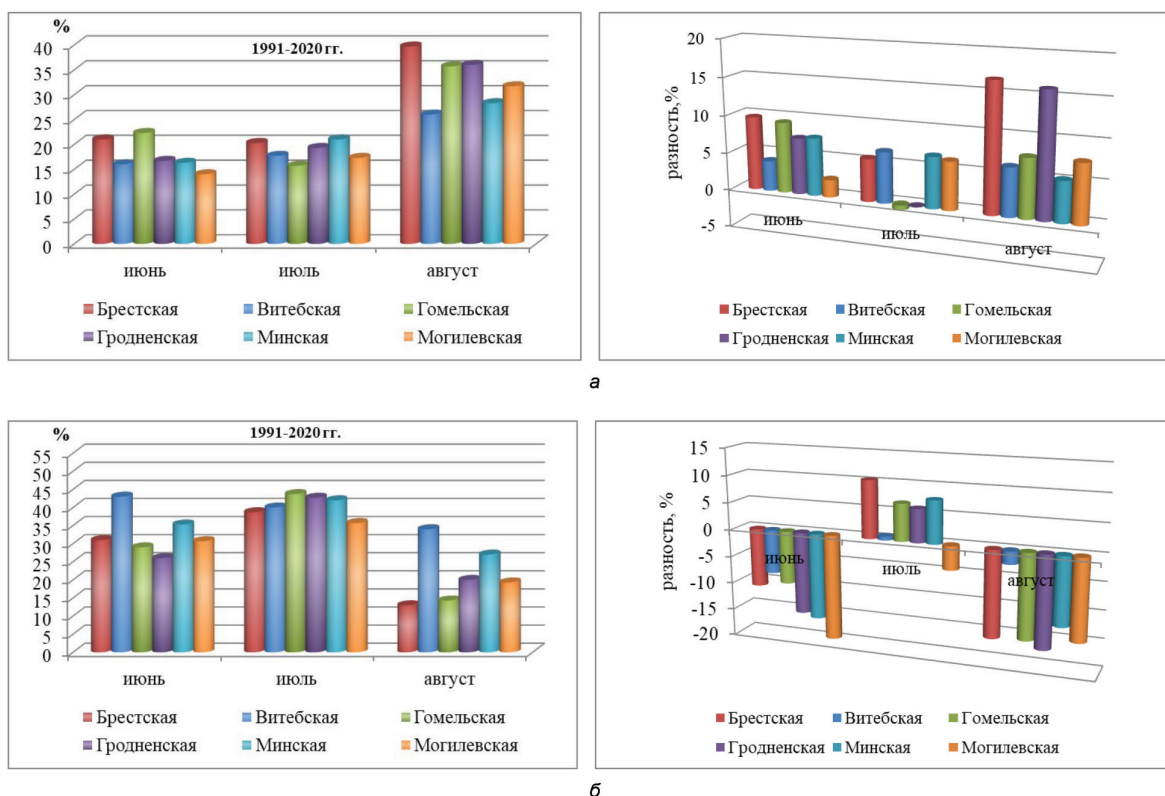


Рис. 6. Средняя для областей повторяемость и разность повторяемости по сравнению с 1961–1990 гг.: а – атмосферной засухи (% лет с ГТК 0,7 и менее); б – избыточного увлажнения (% лет с ГТК более 1,6) в июне–августе 1991–2020 гг.

В лаборатории климатических исследований Института природопользования НАН Беларуси с использованием глобальных климатических моделей CMIP6 для четырех сценариев антропогенного радиационного воздействия рассчитаны регионально адаптированные проекции изменения месячных и сезонных значений температуры воздуха, осадков в областях Беларуси на конец текущего столетия [24].

Рассмотрены сценарии с высокими (SSP3-7.0) и очень высокими (SSP5-8.5) выбросами парниковых газов и выбросами CO₂, которые увеличатся в 2 раза к 2100 и 2050 гг. соответственно; сценарий с промежуточным уровнем (SSP2-4.5) выбросов парниковых газов и выбросами CO₂, которые сохранятся примерно на текущем уровне до середины века; сценарий с низкими уровнями (SSP1-2.6) выбросов парниковых газов и выбросами CO₂, снижающимися до нуля после 2050 г. [25].

С использованием полученных проекций изменения климатических параметров на территории Беларуси выполнена оценка изменений температуры воздуха и суммарного количества осадков в летние месяцы в областях Беларуси в 2021–2050 гг. по сравнению с показателями предыдущего тридцатилетия (1991–2020 гг.), принятыми в качестве климатической нормы.

На основании прогнозных значений средней температуры воздуха и количества осадков в 2021–2050 гг. рассчитаны средние значения гидротермического коэффициента с июня по август, в целом летний период для областей Беларуси (рис. 7). Выявлены изменения ГТК по сравнению с климатической нормой 1991–2020 гг.

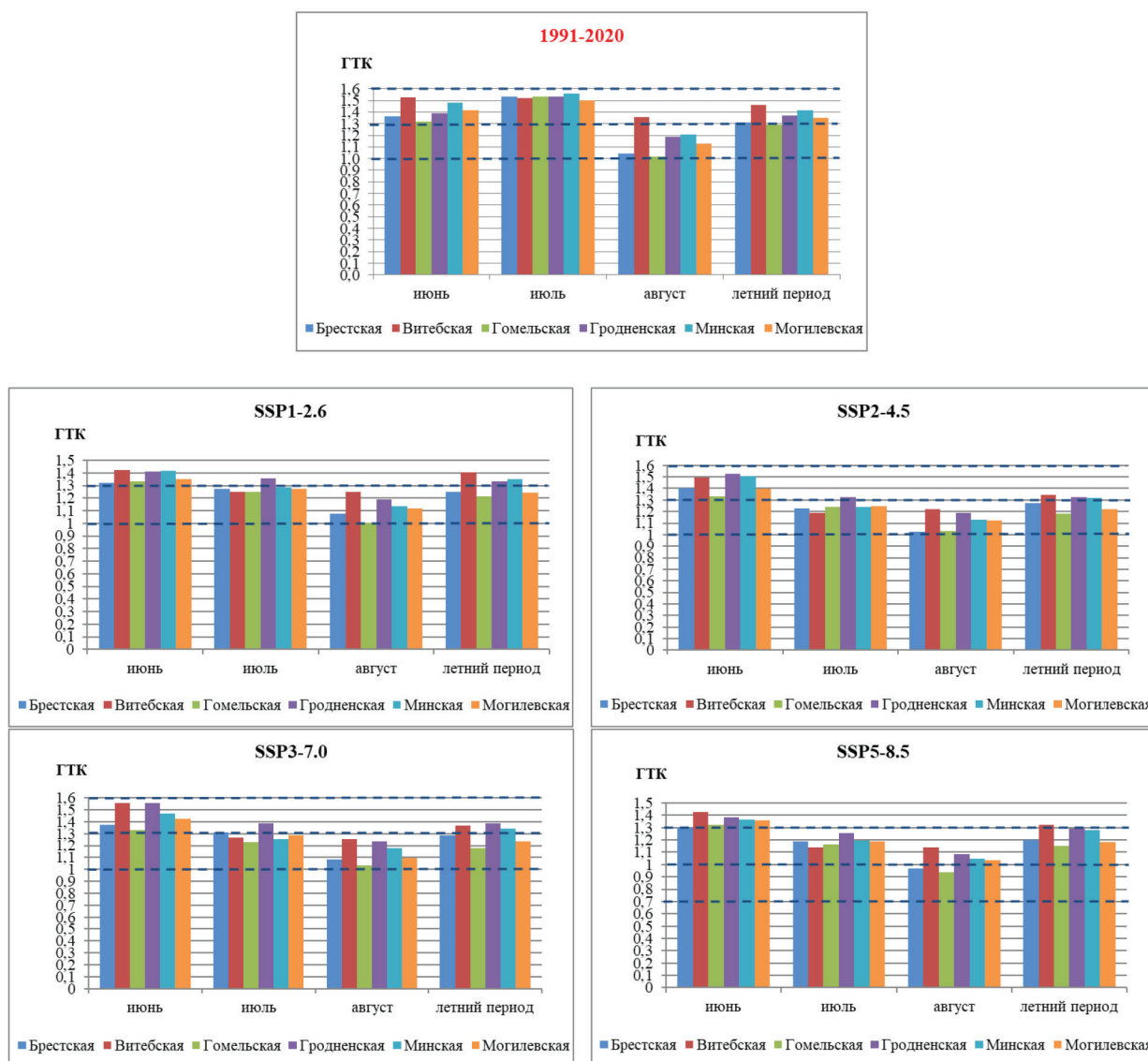


Рис. 7. Прогнозные значения гидротермического коэффициента в 2021–2050 гг. для различных сценариев выбросов парниковых газов по сравнению с климатической нормой (1991–2020 гг.)

По климатической норме 1991–2020 гг. оптимальные условия увлажнения отмечаются в июне – июле во всех регионах, в августе – только в Витебской обл. Для большей части территории Беларуси характерны слабозасушливые условия в августе. Летний период в целом характеризуется достаточным увлажнением, причем для южных областей оно соответствует нижней границе оптимума.

По сценариям SSP1-2.6 и SSP2-4.5 слабозасушливые условия (ГТК 1,0–1,3) прогнозируются в августе на всей территории Беларуси, а также в июле во всех областях, кроме Гродненской. Для сценария SSP3-7.0 отмечаются слабозасушливые условия в августе на всей территории, в июне – в четырех областях, за исключением Брестской и Гродненской. По сценарию SSP5-8.5 прогнозируются слабо-

засушливые условия в июле во всех регионах Беларуси, в августе – в большинстве областей. Будут также наблюдаться засушливые условия (ГТК менее 1,0) в августе в южных областях. В июне будут сохраняться оптимальные условия увлажнения по ГТК для всех сценариев и регионов.

Заключение. В соответствии с новыми нормами ВМО выполнена оценка атмосферного увлажнения в июне – августе за период потепления климата (1991–2020 гг.). Установлено распространение в это время на большей части территории Беларуси оптимальных условий увлажнения по ГТК, засушливых условий (на юго-востоке, северо-востоке и в центральной части страны) по индексу Педя. По стандартизированному индексу осадков территория Беларуси характеризуется как нормальным увлажнением (почти весь юг, северо-восток, крайний восток страны), так и слабозасушливыми условиями в вегетационный период.

При рассмотрении аномалий увлажнения в отдельные летние месяцы по всем трем индексам отмечаются засушливые условия в августе на большей или почти всей территории страны. В июле локально наблюдаются засушливые условия по всем показателям, избыточное увлажнение – по ГТК. В июне слабая засуха выражена на большей части территории по SPI (особенно на западе страны), в западной и юго-восточной частях Беларуси – по ГТК.

Оценка числа лет с аномальным атмосферным увлажнением в летние месяцы за период 1991–2020 гг. показала наибольшую повторяемость атмосферной засухи по ГТК (0,7 и менее) в августе. Примерно для половины территории Беларуси засуха отмечается в 30–50 %, ее повторяемость увеличивается на юго-востоке и западе страны. Избыточное увлажнение (ГТК более 1,6) в период потепления чаще всего наблюдается в июле; его повторяемость в этот месяц на большей части территории Беларуси составляет от 40 до 70 % (метеостанция «Житковичи»). По сравнению с 1961–1990 гг. наибольшее увеличение средней для областей повторяемости атмосферных засух отмечено в августе в Брестской и Гродненской обл. (на 16–17 %). Значительно снижается повторяемость избыточного атмосферного увлажнения в июне в Гродненской, Минской (на 14–15%) и Могилевской обл. (на 19 %), в августе – во всех областях (на 12–17 %), кроме Витебской.

Прогнозная оценка ГТК в 2021–2050 гг. для различных сценариев выбросов парниковых газов показала, что по сравнению с 1991–2020 гг. увлажнение уменьшится от оптимальных до слабозасушливых условий на территории Беларуси в июле, в августе сохранятся слабозасушливые условия или сформируются засушливые условия в южных областях. В июне условия увлажнения не изменятся и будут оптимальными. В целом для летнего периода в половине областей, а по сценарию SSP5-8.5 только в Витебской обл. сохранится достаточное увлажнение. В Могилевской и южных областях или на большей части территории страны (по сценарию SSP5-8.5) будут наблюдаться слабозасушливые условия.

Список использованных источников

1. *Логинов, В. Ф.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск: УП «Энциклопедикс», 2020. – 264 с.
2. *Данилович, И. С.* Экстремальные проявления в режиме увлажнения на территории Беларуси в условиях трансформации климата / И. С. Данилович, Н. Г. Пискунович // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. – 2021. – № 2. – С. 32–44.
3. *Данилович, И. С.* Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе / И. С. Данилович, Ю. А. Гледко, И. В. Тарасевич // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 9. – С. 61–71. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-61-71>.
4. *Бровка, Ю. А.* Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата / Ю. А. Бровка, И. В. Бужков // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 5–18.
5. Почвенные засухи на территории Беларуси в условиях изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2023. – № 2. – С. 12–21.
6. Пространственно-временные изменения почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 15–21.
7. *Червань, А. Н.* Оценка и внутрирегиональные различия уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к засухам в условиях потепления климата / А. Н. Червань, В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 444–453.
8. *Мееровский, А. С.* Уязвимость почв сельскохозяйственных земель к засухам в условиях потепления климата Белорусского Полесья / А. С. Мееровский, В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Мелиорация. – 2021. – № 2 (96). – С. 29–36.
9. *Грингоф, И. Г.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия / И. Г. Грингоф, А. Д. Клещенко. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. – 808 с.
10. *Черенкова, Е. А.* Количественные оценки атмосферных засух в федеральных округах европейской территории России / Е. А. Черенкова // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2013. – № 6. – С. 76–85.
11. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов / Д. Ю. Васильев [и др.] // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 494, № 1. – С. 91–96.

12. Галимова, Р. Г. Агроклиматические ресурсы Республики Башкортостан / Р. Г. Галимова, Ю. П. Переведенцев, Г. А. Яманаев // Вестн. ВГУ. Сер. География. Геоэкология. – 2019. – № 3. – С. 29–39.
13. Черенкова, Е. А. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи / Е. А. Черенкова, А. Н. Золотокрылин // Фундам. и приклад. климатология. – 2016. – № 2. – С. 79–94. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>.
14. Задорнова, О. И. Сравнительная характеристика зарубежных индексов оценки засух по основным зерносеющим субъектам европейской территории России / О. И. Задорнова // Тр. ГГО имени А. И. Воейкова. – 2015. – Вып. 578. – С. 126–139.
15. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур / А. И. Страшная [и др.] // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Рос. Федерации. – 2015. – Вып. 357. – С. 81–97.
16. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов / Д. Ю. Васильев [и др.] // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 494, № 1. – С. 91–96.
17. Агроклиматические ресурсы Белорусской ССР. Материалы гидрометеорологических наблюдений / под ред. М. А. Гольберга, В. И. Мельника. – Минск, 1985. – 451 с.
18. Зоидзе, Е. К. О подходе к исследованию неблагоприятных агроклиматических явлений в условиях изменения климата в Российской Федерации / Е. К. Зоидзе // Метеорология и гидрология. – 2004. – Вып. 1. – С. 96–105.
19. Декадный бюллетень / ВНИИСХМ – Центр мониторинга засух. – 2020. – № 15 (21–30 сент.). – 33 с.
20. Изменения климатических условий и ресурсов Среднего Поволжья: учеб. пособие по регион. климатологии / Ю. П. Переведенцев [и др.]; науч. ред. Э. П. Наумов. – Казань: Центр инновац. технологий, 2011. – 296 с.
21. Галимова, Р. Г. Агроклиматические ресурсы Республики Башкортостан / Р. Г. Галимова, Ю. П. Переведенцев, Г. А. Яманаев // Вестн. ВГУ. Сер. География. Геоэкология. – 2019. – № 3. – С. 29–39.
22. Справочник по показателям и индексам засушливости [Электронный ресурс]. – 2016. – URL:https://www.drought-management.info/literature/WMO-GWP-Drought-Indices_ru_2016.pdf (дата обращения 22.02.2023)
23. Всемирная метеорологическая организация: руководство для пользователей стандартизированного индекса осадков / М. Свобода, М. Хайес и Д. Вуд. (ВМО-№ 1090), Женева [Электронный ресурс]. – 2012. – URL:https://www.drought-management.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_ru_2012.pdf (дата обращения 05.06.2023).
24. Лысенко, С. А. Квазипериодические компоненты температуры воздуха в Беларуси, механизмы формирования и учет в климатических проекциях на основе глобальных численных моделей СМIP6 / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Брест, 26–28 окт. 2023 г. – 2023. – Ч. 1. – С. 3–6.
25. МГЭИК, 2021: Резюме для политиков. В: Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы Iв Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Массон-Дельмонтт, М.П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, С. Бергер, Н. Кауд, Ю. Чэнь, Л. Голдфарб, М.И. Гомис, М. Хуан, К. Лейтцелл, Э. Лонной, Дж. Б.Р. Мэтьюз, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, О. Йелекчи, Р.Ю. и Б. Чжоу (ред.)]. Кембридж юниверсити пресс. – URL:https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Russian.pdf (дата обращения: 05.06.2023).

Поступила 13.04.2024

С. А. Лысенко, М. А. Хитриков*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси Минск, Беларусь,
e-mail: lysenko.nature@gmail.com***ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ**

Аннотация. Представлены актуальные оценки современных и прогнозы будущих изменений климата Гомельской обл. Беларуси. На основе данных дистанционного зондирования Земли проанализированы тренды изменений биоклиматических параметров различных типов земель (вегетационный и водный индекс, амплитуда суточного хода температуры, суммарное испарение и его составляющие) в пределах Гомельской обл. за период 2000–2023 гг. Показано, что статистически достоверным ($p < 0,05$) отрицательным трендом спектрального водного индекса, характеризующего содержание воды в почве и тканях растений, охвачено свыше 40 % пахотных земель Гомельской обл. Примерно на 20 % пахотных земель области отмечаются статистически достоверные тенденции снижения транспирации растений и роста испарения с почвы. Треть пахотных земель области подвержена усилению суточных колебаний температуры (коэффициент тренда до 0,3 °C/год). В противоположность этому на землях области со статистически достоверным ростом вегетационного индекса отмечаются снижение испарения с поверхности почвы, рост транспирации растительности и сокращение амплитуды суточных колебаний температур, что указывает на перспективность внедрения методов агролесоводства для улучшения биоклиматических показателей пахотных земель на юге Беларуси.

Ключевые слова: аридность климата, вегетационный индекс NDVI, водный индекс NDWI, эвапотранспирация, температура поверхности

S. A. Lysenko, M. A. Khitrykau*Institute of nature management of the National academy of sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: lysenko.nature@gmail.com***ESTIMATION OF MODERN CHANGES IN THE BIOCLIMATIC CHARACTERISTICS
OF THE SOIL AND PLANT COVER OF THE HOMIEL REGION**

Abstract. The article presents actual assessments of current and projected climate changes in Homiel region of Belarus. Trends of changes in bioclimatic parameters of different land cover types (vegetation and water indices, daily temperature amplitudes, total evaporation and its components) within Homiel region have been analysed on the basis of remote sensing data for the period from 2000 to 2023. It was shown that statistically significant ($p < 0.05$) negative trend of spectral water index, characterising water content in soil and plant tissues, is observed on more than 40 % of arable land in Homiel region. About 20 % of arable lands of the region have statistically reliable tendencies of decrease in transpiration of plants and increase in evaporation from the soil. One third of arable land in the region is subjected to increased daily temperature fluctuations (trend coefficient up to 0.3 °C/year). In contrast, on the lands of the region with statistically significant growth of vegetation index there are decrease in evaporation from the soil surface and increase in transpiration of vegetation and reduction in daily temperature amplitudes, which indicates the prospect of introducing agroforestry methods to improve the bioclimatic indicators of arable land in the southern regions of Belarus.

Keywords: aridity of climate, NDVI, NDWI, evapotranspiration, surface temperature

С. А. Лысенка, М. А. Хітрыкаў*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: lysenko.nature@gmail.com***АЦЭНКІ СУЧАСНЫХ ЗМЕН БІЯКЛІМАТЫЧНЫХ ПАРАМЕТРАЎ
ГЛЕБАВА-РАСЛІНАГА ПОКРЫВА ГОМЕЛЬСКОЙ ВОБЛАСЦІ**

Анотацыя. Прадстаўлены актуальныя ацэнкі сучасных і прагнозы будучых змен клімату Гомельскай вобл. Беларусі. На аснове даных дыстанцыйнага заздзіравання Зямлі прааналізаваны трэндзы змен біякліматых параметраў розных тыпаў земляў (вегетатыўны і водны індэкс, амплітуда сутачнага хода тэмпературы, сумарнае выпарэнне і яго састаўляючыя) у межах Гомельскай вобл. за перыяд 2000–2023 гг. Паказана, што статыстычна пэўным ($p < 0,05$) адмоўным трэндам спектральнага воднага індэкса, які характарызуе колькасць вады ў глебе і тканках раслін, ахоплены звыш 40 % ворных зямель Гомельскай вобл. Прыкладна на 20 % ворных зямель вобласці адзначаюцца статыстычна пэўныя тэндэнцыі зніжэння транспірацыі раслін і росту выпарэння з глебы. Траціна ворных зямель вобласці схільна да ўзмацнення сутачных хістанняў тэмператур (каэфіцыент трэнду да 0,3 °C/год). У супрацьлегласць гэтаму на землях вобласці са статыстычна пэўным ростам вегетатыўнага індэкса адзначаюцца зніжэнне выпарэння з паверхні глебы, рост траспірацыі расліннасці і скарачэнне сутачных хістанняў тэмпературы, што сведчыць пра перспектыўнасць укаранення метадаў агралесаводства для паляпшэння біякліматых паказчыкаў ворных зямель на поўдні Беларусі.

Ключавыя словы: арыднасць клімату, вегетатыўны індэкс NDVI, водны індэкс NDWI, эвапатранспірацыя, тэмпература паверхні

Введение. Актуальность проблемы глобального потепления обусловлена тем, что оно проявляется не только в росте температур и с связанных с этим изменениях климата, но и в трансформациях окружающей среды в целом. Для Беларуси проблема современных изменений климата стоит особенно остро, так как на территории страны среднегодовая температура растет со скоростью, втрое превышающей скорость глобального потепления [1, 2]. Это приводит к смещению границ агроклиматических областей в северном направлении примерно на 10 км в год, уменьшению разницы между годовым количеством осадков и потенциальным испарением примерно на 6 мм в год и внутригодовому перераспределению количества выпадающих осадков (на большей части территории страны в летний период количество осадков не изменяется или повышается незначительно по сравнению с другими сезонами года) [1]. Все это в совокупности приводит к усилению засушливости (аридности) климата в Беларуси. Так, если раньше территория Беларуси относилась к зоне избыточного увлажнения [3], то сейчас потенциальное испарение превалирует над осадками почти на всей территории Брестской и Гомельской обл. Беларуси. Среднее для Беларуси значение индекса аридности (A/I), определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1980 по 2020 г. уменьшилось на 30 % и в современный период составляет примерно 0,8.

Наиболее уязвимым перед современным изменением климата является регион Белорусского Полесья, подвергшийся в 1960–1970-е гг. осушительной мелиорации, результатом чего стала масштабная деградация торфяных почв. Данные наблюдений показывают, что климат мелиорированных территорий является наиболее экстремальным по ряду показателей: продолжительность и интенсивность заморозков, повторяемость зим с низкими температурами и малой высотой снежного покрова, продолжительность периодов с высокой температурой воздуха и др. [4, 5]. Усиление засушливости климата этого региона и нехватка почвенной влаги оказывают крайне негативное влияние на продуктивность большинства местных видов растительности и сельскохозяйственных культур, выращиваемых в данном регионе [2, 6–8].

В настоящей работе представлены актуальные оценки современных изменений климата Гомельской обл. и регионально адаптированные проекции его будущих изменений на основе ансамбля глобальных климатических моделей проекта CMIP6. Проанализированы тренды биоклиматических показателей земель региона, рассчитанные по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) за 2000–2023 гг. В числе рассматриваемых показателей – нормализованные разностные спектральные индексы, характеризующие фотосинтетически активную биомассу и содержание воды в почвенно-растительном покрове; амплитуда суточных колебаний температуры земной поверхности; суммарное испарение и ее составляющие (транспирация растительности и испарение с почвы). Оценивается процент земель области и отдельно – сельскохозяйственных земель с ухудшением биоклиматических показателей на уровне статистической значимости 0,05. Анализируется изменение биоклиматических показателей на землях со статистически достоверным ростом вегетационного индекса.

Оценки современных и прогнозы будущих изменений климата Гомельской обл. Изменения климатических параметров на территории Гомельской обл. анализировались с использованием разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси и регулярно обновляемого цифрового сеточного архива метеорологических данных, который объединяет среднемесячные метеорологические ряды наблюдений для территории Беларуси и соседних государств и использует методы пространственной интерполяции для построения метеорологических полей на равномерной сетке географических координат и автозаполнения пропусков в данных [9].

Среднегодовая температура в Гомельской обл. за период 1991–2020 гг., рекомендуемый Всемирной метеорологической организацией для климатического усреднения, превысила ее значение за предшествующий период (1961–1990 гг.) на 1,3 °С (рис. 1, а). Аналогичный рост средней температуры для сезонов составил: зимой – 1,91 °С, летом – 1,36 °С, весной – 1,19 °С, осенью – 0,67 °С. Анализ изменения температуры на основе первой эмпирической ортогональной компоненты ее временного ряда [1] дает следующие оценки потепления в Гомельской обл.: +1,50 °С – зимой, +1,70 °С – летом, +1,23 °С – весной, 1,12 °С – осенью, + 1,54 °С – в среднем за год.

Годовая сумма атмосферных осадков за прошедший период потепления в среднем по Гомельской обл. увеличилась незначительно – на 18 мм, или на 3 % от нормы 1961–1990 гг. (рис. 1, б). Однако на западе региона увеличение годовой суммы осадков достигало 60 мм. Одновременно с этим годовая сумма осадков статистически достоверно понизилась на северо-востоке области (максимально на 100 мм).

Сумма зимних осадков в среднем по области увеличилась на 4,5 % от нормы 1961–1990 гг. Рост осадков произошел главным образом за счет центральной части области. Статистически достоверное понижение суммы зимних осадков отмечается только на северо-востоке области.

Средняя по области сумма летних осадков уменьшилась на 4 %. Максимальное уменьшение суммы летних осадков (на 24 %) отмечалось на северо-востоке области. Заметно увеличилась сумма осадков

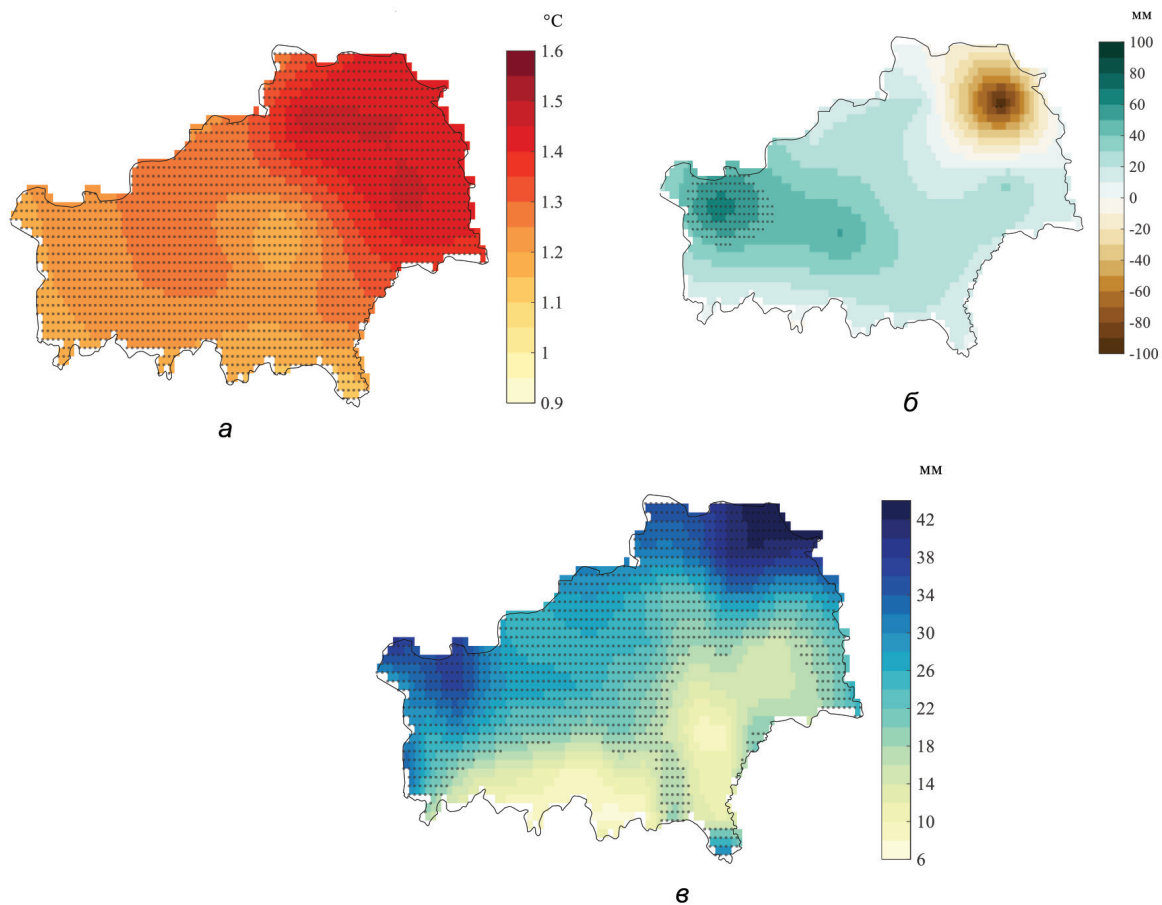


Рис. 1. Карты изменений среднегодовых значений температуры (а), атмосферных осадков (б) и суммарного испарения (в) на территории Гомельской обл. (точками отмечены районы со статистически значимыми ($p < 0,01$) изменениями климатических параметров)

для весеннего периода – на 13,7 %. Исключение составила лишь небольшая северо-восточная часть области. Сумма осадков для осеннего периода также увеличилась (в среднем на 8,6 %), однако это увеличение не отвечает критериям статистической значимости.

Среднегодовое испарение на территории Гомельской области (рис. 1, в) в результате потепления увеличилось на 22,7 мм (примерно на 5,2 % по отношению к периоду 1961–1990 гг.). Наиболее существенный рост испарения +7,4 %, или 10,3 мм по отношению к периоду 1961–1990 гг., отмечался весной, что вызвано ускоренным снеготаянием и более ранним наступлением вегетационного периода. Испарение в летний период, несмотря на достаточно интенсивное летнее потепление, увеличилось на сравнительно небольшую величину – 2,8 % (+7 мм), что, по-видимому, связано с уменьшением влажности почвы и понижением уровней поверхностных вод в результате частых засух и уменьшения летнего стока. Средняя эвапотранспирация для осеннего периода в результате потепления почти не изменилась.

Для того чтобы оценить масштаб рисков, обусловленных усилением засушливости, рассмотрим изменения индекса аридности на территории Гомельской обл. В настоящей работе используется метод вычисления AI на основе среднего за многолетний период отношения сумм атмосферных осадков (P) и потенциального испарения (ET_0) (испаряемости):

$$AI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{ET_0}, \quad (1)$$

где индекс i обозначает год, к которому относятся значения осадков и потенциального испарения, n – длительность периода (в годах), используемого для усреднения отношения P/ET_0 .

Испаряемость ET_0 показывает потенциально возможное (не лимитируемое запасами воды) испарение в данной местности при существующих в ней атмосферных условиях. Согласно методике FAO 56 [10] ET_0 вычисляется на основе уравнения Пенмана–Монтейса и уравнения энергетического баланса.

Испаряемость рассчитывается для эталонной поверхности без дефицита воды, за которую принимается гипотетический травяной покров со специфическими характеристиками. Эталонное суммарное испарение ET_0 определяется по формуле:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{0,925}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (2)$$

где ET_0 – эталонная эвапотранспирация (мм сут^{-1}); R_n – чистая радиация на поверхности культуры ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$); G – плотность теплового потока почвы ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$); T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м ($^{\circ}\text{C}$); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м (мс^{-1}); e_s – давление насыщенного пара (кПа); e_a – фактическое давление пара (кПа); $(e_s - e_a)$ – дефицит давления насыщенного пара (кПа); Δ – наклон кривой давления пара (кПа К^{-1}); γ – психрометрическая постоянная (кПа К^{-1}).

С точки зрения сельского хозяйства наибольшее значение имеет влагообеспеченность мая и июня, поскольку именно на эти месяцы приходится основной период роста и развития яровых культур. Результаты расчетов индекса аридности территории Беларуси для данных месяцев, характеризующие период 2000–2022 гг., представлены на рис. 2.

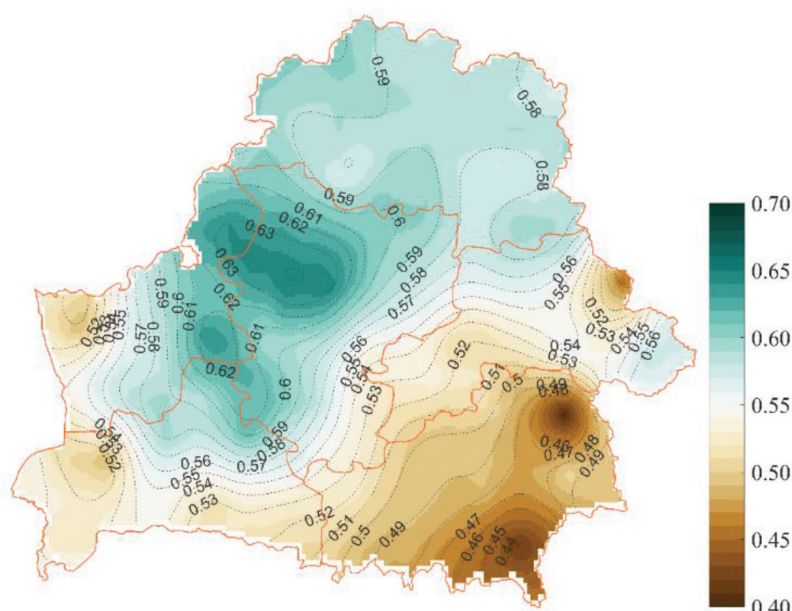


Рис. 2. Пространственное распределение индекса аридности для мая – июня с усреднением за 2000–2022 гг.

Как видно из рис. 2, для территории Гомельской обл. проблема усиления засушливости климата стоит наиболее остро. До начала периода современного потепления в Беларуси (1961–1990 гг.) индекс аридности Гомельской обл. изменялся в пределах от 0,52 до 0,63. В современный период (2000–2022 гг.) его значения находятся в диапазоне 0,43–0,51, что в методике глобального агроэкологического зонирования ФАО соответствует семиаридным районам.

Прогнозы будущих изменений климата основываются на расчетах глобальных климатических моделей. Авторами для этой цели использовался ансамбль моделей, объединенных в последней (шестой) фазе международного проекта CMIP. Антропогенные воздействия учитываются в климатических моделях как форсинги, вызывающие изменение климата. Различные гипотетические варианты антропогенных форсингов принято называть сценариями. Рассматривались четыре сценария, разработанные межправительственной группой экспертов по изменению климата на основе прогнозов развития мировой экономики и социально-экономических процессов.

Проект CMIP6 объединяет свыше 30 численных моделей климата, однако не все они одинаково хорошо воспроизводят особенности изменения климата в Беларуси. Ретроспективные расчеты по каждой модели тестировались на региональном уровне путем сравнения. Для каждого из анализируемых климатических параметров определялся наилучший для его прогнозирования ансамбль из 10 моделей с наибольшим коэффициентом корреляции между фактическими и прогнозными значениями данного параметра для ретроспективного периода.

Проекции на конец текущего столетия средней температуры и суммы атмосферных осадков в Гомельской обл., рассчитанные для теплого периода года с использованием оптимальных ансамблей климатических моделей, представлены на рис. 3. Выбранный ансамбль моделей достаточно хорошо воспроизводит тренды изменений температуры и атмосферных осадков для ретроспективного периода (систематические ошибки моделей устранены на этапе формирования оптимальных ансамблей). Тренд изменения температуры за период с начала потепления в Беларуси и до настоящего времени лучше всего согласуется с климатической проекцией для сценария SSP3–7.0. В проекциях изменений суммы атмосферных осадков, как и в данных наблюдений, статистически значимый тренд до середины текущего столетия отсутствует.

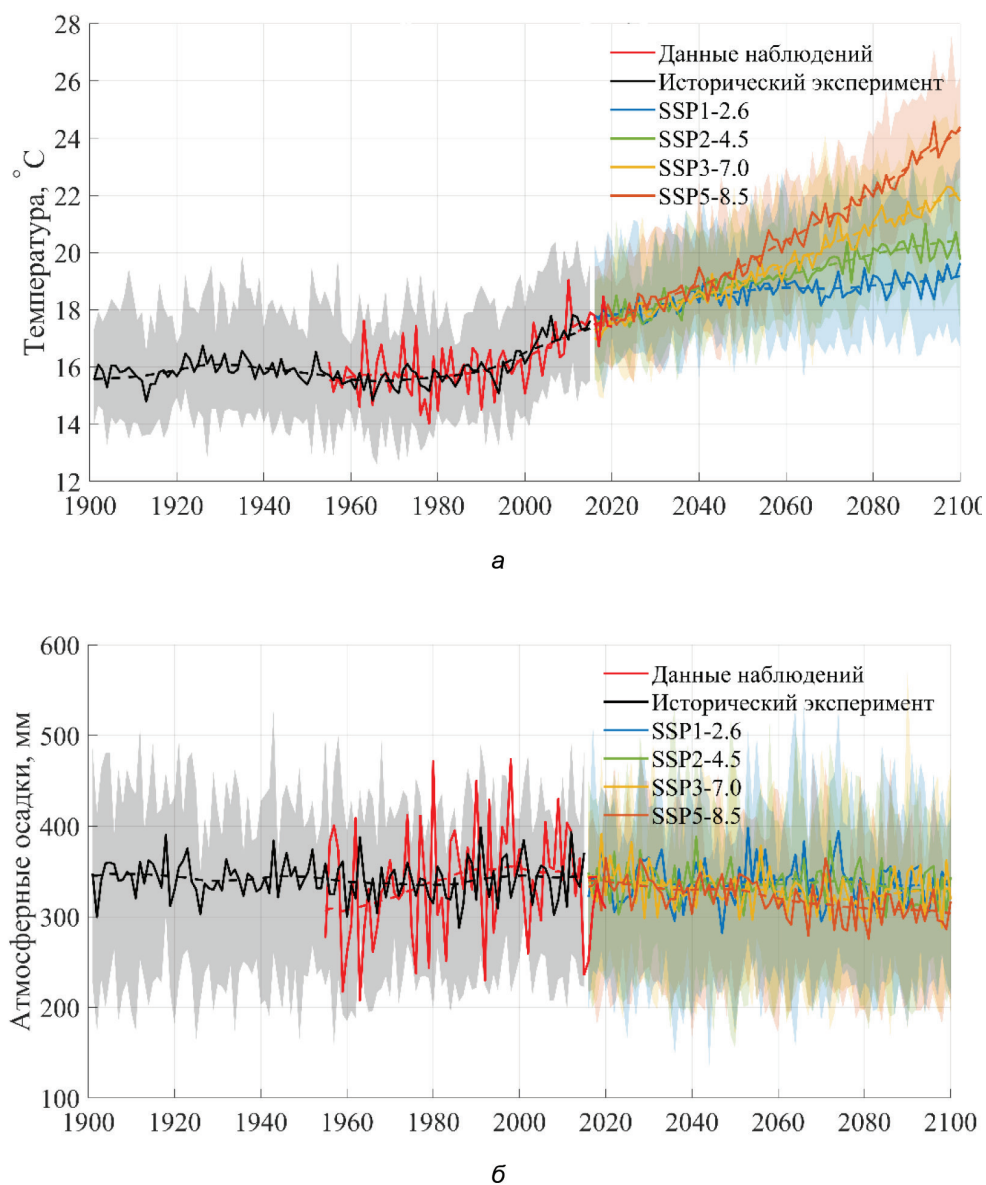


Рис. 3. Прогнозы средней температуры (а) и суммы атмосферных осадков (б) в теплый период года (май – сентябрь) для ретроспективного и будущего периодов в четырех сценариях антропогенного радиационного воздействия (SSP)

Согласно представленным расчетам к середине текущего столетия ожидается рост средней температуры в теплый период года на 3,0–3,8 °C относительно базового периода 1961–1990 гг. Проекция изменения температуры на конец столетия для разных сценариев существенно различаются – от 3,3 °C в сценарии SSP1–2.6 до 7,6 °C в сценарии SSP5–8.5. Значимых изменений суммы атмосферных осадков в теплый период года до середины столетия не ожидается, после чего возможно их небольшое уменьшение (к концу столетия на 7,7 %) только в сценарии SSP5–8.5.

При почти неизменной сумме атмосферных осадков в теплый период года, что имеет место для территории Гомельской обл. и прогнозируется как минимум до середины текущего столетия, и росте температур, соответствующем одному из самых жестких сценариев глобального потепления SSP3–7.0, разность между потенциальным испарением и осадками продолжит возрастать, причем с ускорением. Это означает, что аридизация климата в данном регионе будет только усиливаться, влияя на природную среду, экономику и условия проживания людей. В этой связи рассмотрим оценки влияния аридизации на биоклиматические показатели и водный режим земель в Гомельской обл.

Оценки изменений биоклиматических показателей земель по данным ДЗЗ. Оценки изменений состояния почвенно-растительного покрова на территории Гомельской обл. за период потепления проводились с использованием вегетационного NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и водного NDWI (Normalized Difference Water Index) индексов, определяемых по спектру отражения солнечного излучения от земной поверхности, с учетом характерных полос поглощения света хлорофиллом и водой в почвенно-растительных покровах.

Индекс NDVI вычисляется с использованием спектральных каналов 620–670 нм (красный) и 841–876 нм (ближний ИК-диапазон) фотоприемной аппаратуры спутникового прибора MODIS. Выбор каналов основан на свойстве зеленой растительности избирательно поглощать солнечное излучение в красном участке спектра и эффективно отражать его в ближнем ИК-диапазоне, что позволяет достаточно надежно отделять растительность от прочих природных и антропогенных объектов на многоспектральных спутниковых снимках. Для растительности NDVI всегда принимает положительные значения и растет с увеличением зеленой фитомассы [11].

Для вычисления водного индекса NDWI используются два приемных канала спутниковой аппаратуры Landsat 7, 8 из зеленой области спектра (0,52–0,6 мкм) и коротковолнового инфракрасного диапазона (1,55–1,75 мкм). Данный индекс является высоко чувствительным к изменениям содержания воды в почвенно-растительных покровах. Выбор длин волн основан на особенностях спектра поглощения воды, имеющей минимум поглощения в видимой области и высокие значения в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах.

Оценки изменений вегетационного NDVI и водного NDWI индексов на территории Гомельской обл. производились на основе спутниковых снимков MODIS и Landsat 7, 8, имеющих разрешение 250 и 30 м соответственно. Расчеты выполнялись с использованием программного интерфейса пользователя (API) облачной платформы анализа и обработки геопространственных данных Google Earth Engine на языке программирования Python [12].

Амплитуда суточного хода температуры рассчитывалась на основе спутниковых данных MODIS по дневной и ночной температурам подстилающей поверхности с пространственным разрешением около 1 км.

Расчет изменений эвапотранспирации и ее составляющих (транспирация растительности, испарение с почвы, испарение осадков, перехваченных растительностью) выполнялся по комбинированной биофизической модели Пенмана–Монтейта–Леунинга (PML), которая в качестве входной информации использует данные спутниковых наблюдений и реанализ GLDAS (Global Land Data Assimilation System – Глобальная система ассимиляции данных о земле).

В основе PML-модели лежит расчет эвапотранспирации на основе уравнений теплового баланса и массопереноса с открытой водной поверхностью, впервые предложенных Г. Л. Пенманом [13] и модифицированных Дж. Монтейтом [14]. Позднее уравнение Пенмана–Монтейта (модель PM или FAO-56) было доработано Р. Леунингом формулировкой поверхностной проводимости, в которой учтены физические характеристики растительного покрова и потеря влаги почвой (модель PML) [15]. Модель PML была усовершенствована за счет включения испарения осадков, перехватываемых растениями, и разделения компонент суммарной эвапотранспирации на испарение с почвы E_s , транспирацию растительности E_t и испарения осадков, задержанных растительностью E_i (модель PML_V1) [16]. Впоследствии модель PML_V1 была соединена с биофизической проводимостью полого, что дало возможность использовать ее для расчета валовой первичной продукции (модель PML_V2) [17].

Для численных расчетов изменений эвапотранспирации и ее составляющих была выбрана реализация модели PML на базе облачной платформы обработки и анализа геопространственных данных Google Earth Engine (GEE). Схема работы модели подробно описана в работе [18].

Все упомянутые выше биоклиматические параметры подстилающей поверхности рассчитывались с осреднением для теплого периода года. Для оценок трендов их изменений использовался метод Тейла–Сена, менее чувствительный к выбросам (аномалиям в данных), чем классический метод наименьших квадратов. Данный метод определяет коэффициент линейного тренда как медиану коэффициентов наклона прямых, построенных по всем парам точек временного ряда. Статистическая значимость трендов оценивалась на основе непараметрического теста Манна–Кендалла [19].

Тренды рассматриваемых биоклиматических параметров земель Гомельской обл., соответствующие периоду 2000–2023 гг., представлены на рис. 4–8.

Оценки тренда вегетационного индекса NDVI косвенно подтверждают негативное влияние усиления засушливости климата на биологическую продуктивность земель Гомельской обл. – отрицательному тренду NDVI подвержено свыше 60 % земель области. Статистически достоверный отрицательный тренд NDVI ($p < 0,05$) отмечается на 12 % земель области и на 36 % пахотных земель. Вегетационный индекс земель лесного фонда и водно-болотных угодий изменяется незначительно либо даже увеличивается (максимально на 1,5 % в год).

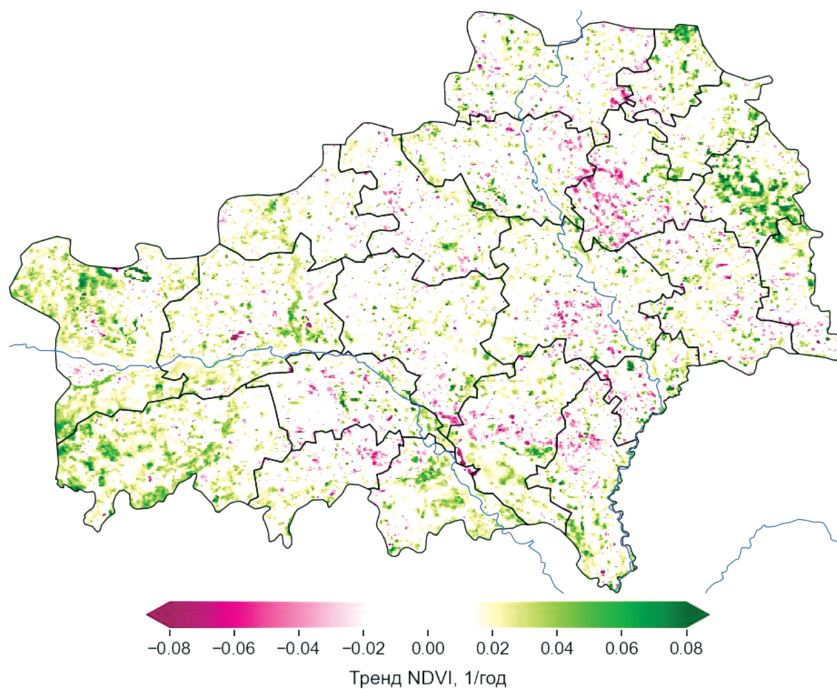


Рис. 4. Карта коэффициента линейного тренда вегетационного индекса NDVI для территории Гомельской обл.

Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусском Полесье подробно исследовано [6–8]. Показано, что в современный период главным фактором, ограничивающим рост биопродуктивности наземных экосистем в данном регионе, является количество атмосферных осадков. Территория Белорусского Полесья по своим биоклиматическим характеристикам в настоящее время относится к зоне с избыточными для фотосинтеза ресурсами тепла и солнечной радиации, но недостаточными ресурсами влаги. Рост температуры и усиление засушливости климата оказывают крайне негативное влияние на биопродуктивность местных экосистем, приводя к потерям запасов в них углерода со скоростью около 750 000 т/год [15]. Особенно остро это проявляется в отношении биологической продуктивности пахотных земель, листовой индекс которых согласно данным дистанционного зондирования Земли понижается со скоростью до 2 % в год [7].

Ранее нами были рассмотрены прямые и обратные связи между температурой воздуха, почвы и растительным покровом для территории Беларуси в летний период [20]. Результаты, полученные в ходе исследования, показывают, что деградация растительного покрова на юге Беларуси сопровождается аномальным ростом температуры почвы и амплитуды ее внутрисуточных колебаний. Свыше половины деградирующих земель (58 %) относится к землям сельскохозяйственного назначения и находится в южной части страны, где быстрое летнее потепление сопровождается усилением засушливости климата. На землях сельскохозяйственного назначения снижение растительного покрова может обуславливать свыше четверти роста средней летней температуры. В свою очередь, рост температуры усиливает потери почвенной влаги на испарение, что в засушливых условиях приводит к угнетению растительности и еще большему сокращению растительного покрова. Эти процессы составляют основу положительных обратных связей между температурой, почвенной влагой и наземной растительностью, ускоряющих деградацию земель в условиях изменения климата. Триггером для запуска таких обратных связей может быть либо частичный свод растительности в результате различных хозяйственных мероприятий, либо недостаточные меры по адаптации сельского и лесного хозяйства к изменению климата.

Наиболее красноречивым свидетельством ухудшающегося водного режима почв Гомельской обл. является карта тренда водного индекса NDWI, представленная на рис. 5. В результате изменения климата водный индекс, характеризующий содержание воды в почве и растительных покровах, уменьшается более чем на 80 % территории Гомельской обл. Максимальная скорость его уменьшения отмечается для водно-болотных угодий и земель сельскохозяйственного назначения, минимальная – для лесных массивов. Около 40 % пахотных земель области демонстрируют статистически достоверную ($p < 0,05$) тенденцию уменьшения водного индекса NDWI.

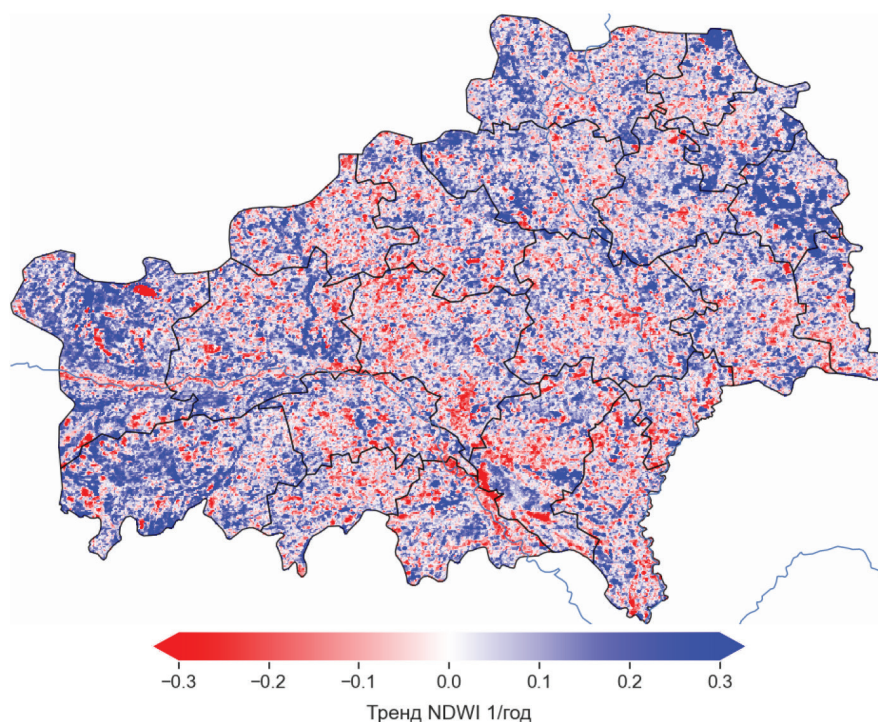


Рис. 5. Карта коэффициента линейного тренда водного индекса NDWI

Статистически достоверный рост NDWI отмечается для более чем половины земель лесного фонда, что свидетельствует о высокой эффективности лесных биоценозов в сохранении водных ресурсов за счет регулирования ими поверхностного и подземного стоков. Лесные почвы, обладающие высокой инфильтрационной способностью, не позволяют атмосферным осадкам и талым водам расходоваться в виде поверхностного стока, что способствует их накоплению в почве и водоносных слоях.

Скорость потепления для теплого периода года во многом зависит от радиационных и эвапотранспирационных факторов регулирования температуры подстилающей поверхности. В этой связи представляет интерес проанализировать изменения эвапотранспирации и ее составляющих в условиях изменяющегося климата. Карты распределения трендов испарения с почвы E_s и транспирации растительности E_c , построенные по модели PML_V2, представлены для Гомельской обл. на рис. 6 и 7. Средние значения составляющих эвапотранспирации и коэффициенты их трендов для периода 2000–2020 гг. представлены с разделением по типу земель в таблице.

Средние значения и коэффициенты линейных трендов составляющих суммарного испарения для трех категорий земель Гомельской обл.

Категория земель	Среднее значение, мм			Коэффициент тренда, мм/год		
	E_s	E_c	E_t	E_s	E_c	E_t
Пашни	76,5	238,5	23,7	+0,19	-0,50	-0,05
Леса	34,9	241,6	55,2	-0,38	+0,44	+0,12
Болота	64,26	215,7	39,6	-0,45	+0,40	+0,14

Суммарное испарение примерно на 70 % состоит из транспирации растительности, вклад испарения с почвы для лесных и заболоченных земель составляет 20–23 %, для земель сельскохозяйственного назначения – около 10 %. В пространственном распределении трендов компонент суммарного

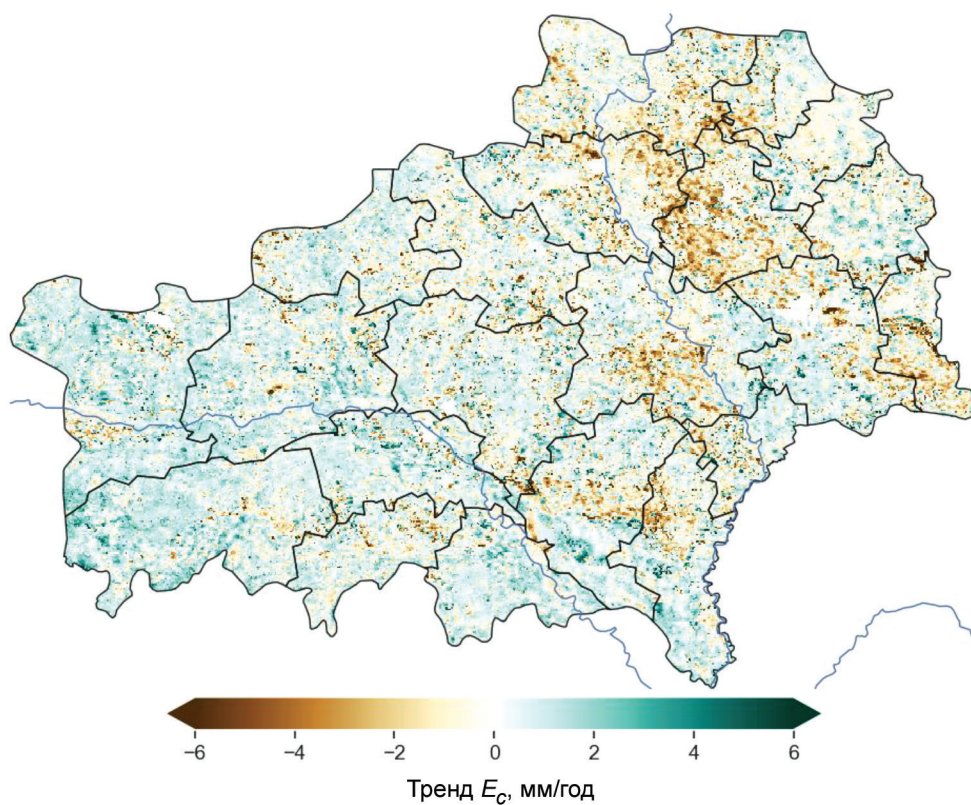


Рис. 6. Коэффициент линейного тренда транспирации растительности в вегетационный период (май – сентябрь)

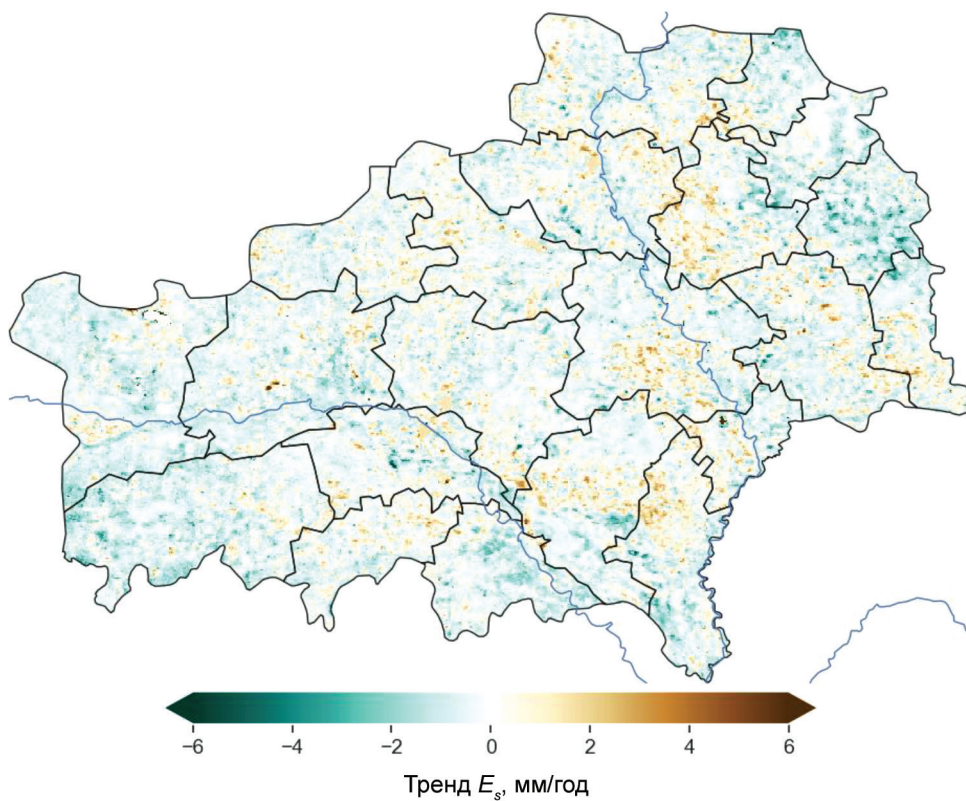


Рис. 7. Коэффициент линейного тренда испарения с почвы в вегетационный период

испарения прослеживаются те же особенности, что и в распределении тренда вегетационного индекса NDVI. В районах с положительным и статистически достоверным трендом NDVI отмечается увеличение E_c и уменьшение E_s , противоположные тенденции наблюдаются в районах со статистически достоверным отрицательным трендом NDVI.

Наибольшему изменению подвержена составляющая суммарного испарения, связанная с транспирацией E_c . В результате потепления ее увеличение отмечается на 74 % площади Гомельской обл. Особенно интенсивен ее рост на лесных землях – положительным трендом E_c охвачено 69 % общей площади лесных массивов области. Транспирация на землях сельскохозяйственного назначения преимущественно уменьшается (статистически достоверно для 22,5 % пахотных земель), что в условиях потепления снижает возможности естественной терморегуляции растений и делает их более уязвимыми перед волнами тепла и засухами.

Испарение с почвы увеличивается более чем на половине (53 %) пахотных земель и лишь на 22 % земель лесного фонда Гомельской обл. Статистически достоверным увеличением E_s ($p < 0,05$) характеризуются около 18 % пахотных и менее 2 % лесных земель области.

На пахотных землях со статистически достоверным отрицательным трендом вегетационного индекса NDVI ($p < 0,01$) испарение с почвы увеличивается в 76 % случаев. В противоположность этому на лесных почвах со статистически достоверным положительным трендом NDVI испарение уменьшается в 87 % случаев. Похожая тенденция отмечается и для заболоченных земель – E_s уменьшается на 86 % переувлажненных земель со статистически достоверным положительным трендом NDVI.

Еще одной тревожной климатической тенденцией, свойственной пахотным землям Гомельской обл., является увеличение амплитуды суточных колебаний их температуры (рис. 8). В результате усиления атмосферного стока влаги почвы региона становятся более сухими, а значит, более подверженными перегреву в дневное и переохлаждению в ночное время суток, что повышает вероятность теплового стресса и заморозков для растений. Важно отметить, что статистически достоверное усиление суточных колебаний температуры в современный период наблюдается примерно для трети пахотных земель Гомельской обл., что представляет серьезную проблему для развития сельского хозяйства в регионе.

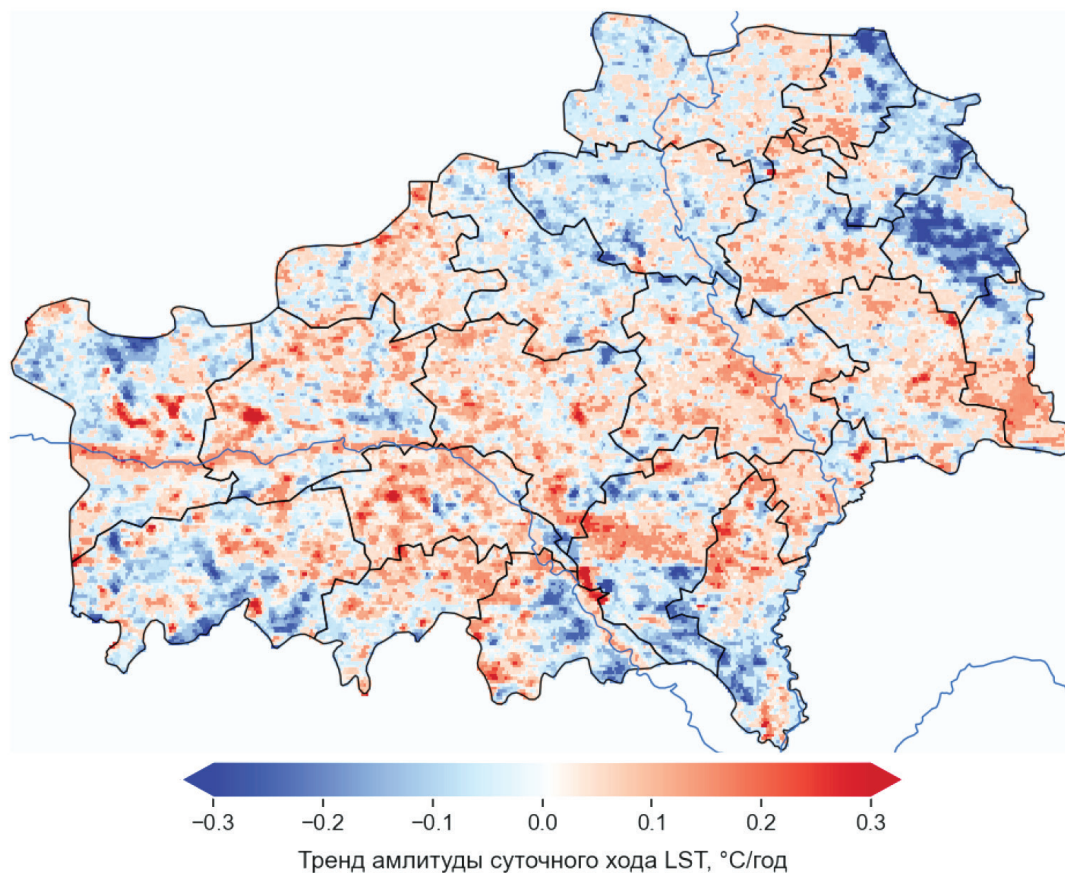


Рис. 8. Коэффициент линейного тренда средней для вегетационного периода амплитуды суточных колебаний температуры подстилающей поверхности

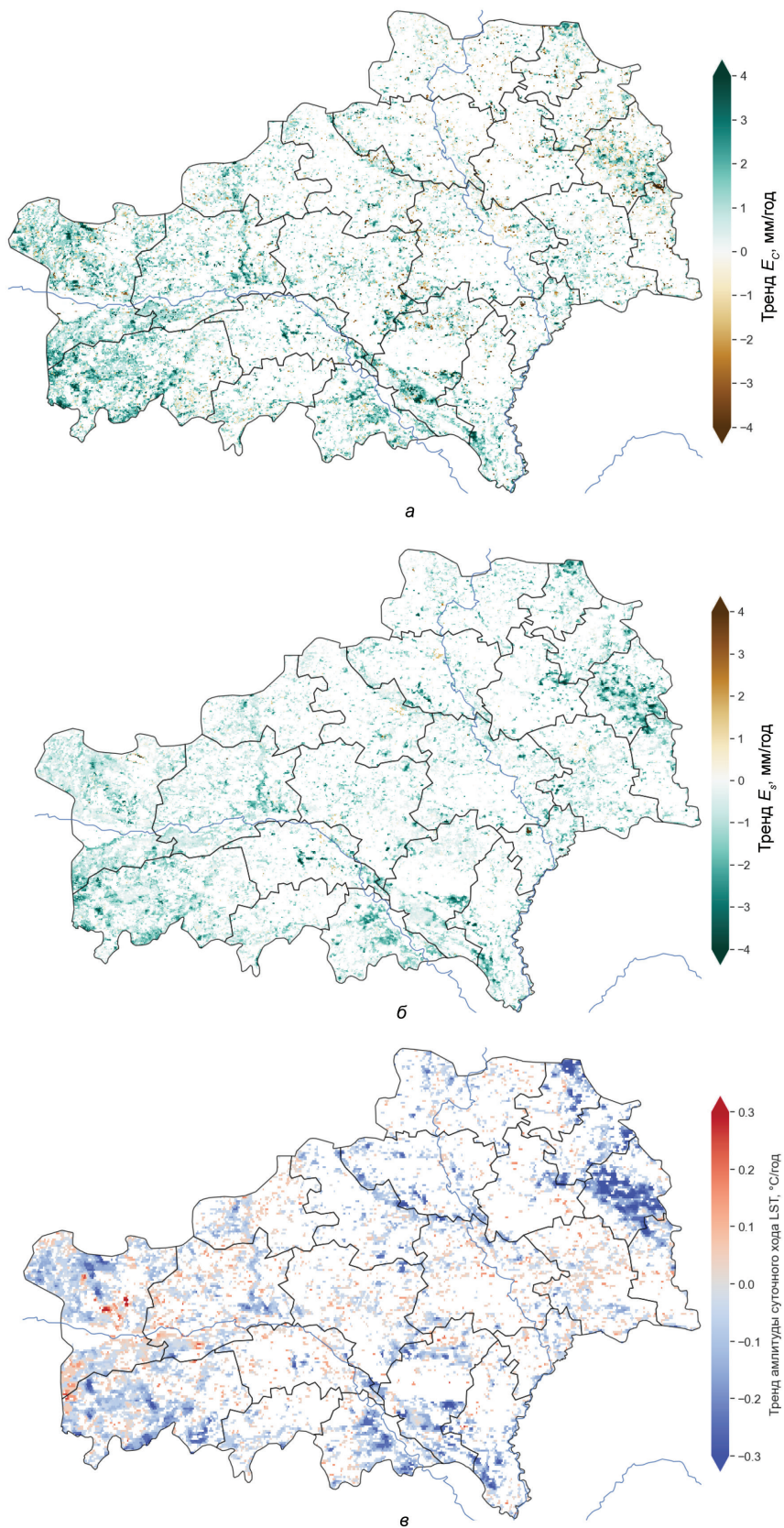


Рис. 9. Коэффициенты линейного тренда транспирации растительности (а), испарения с поверхности почвы (б) и амплитуды суточного цикла температуры (в) для земель Гомельской обл. со статистически достоверным ($p < 0,01$) положительным трендом вегетационного индекса NDVI

С целью оценки возможностей смягчения для лесного и сельского хозяйства региона негативных последствий изменения климата рассмотрим отдельно оценки трендов биоклиматических показателей земель, на которых за период 2000–2023 гг. произошло статистически достоверное ($p < 0,01$) увеличение вегетационного индекса NDVI. Такие оценки предоставляют ценную информацию о том, насколько эффективно мероприятия по увеличению лесистости и созданию защитных лесополос способны повлиять на микроклимат и водный баланс в регионе.

Распределение коэффициентов линейных трендов испарения с почвы, транспирации растительности и амплитуды суточного цикла температуры подстилающей поверхности на землях Гомельской обл. со статистически достоверным ($p < 0,01$) положительным трендом NDVI представлено на рис. 9. Видно, что увеличение лесистости и растительного покрова приводит к увеличению транспирации растений в среднем на 0,81 мм/год (рис. 9, а), к уменьшению испарения с почвы в среднем на 0,73 мм/год (рис. 9, б) и уменьшению внутрисуточных колебаний температуры поверхности в среднем на 0,04 °C/год (рис. 9, в), что эквивалентно тренду 0,024 °C/год для температуры воздуха [20]).

Для пахотных земель с положительным трендом NDVI связаны уменьшение испарения с почвы в среднем на 1,18 мм/год и увеличение транспирации в среднем на 0,79 мм/год. Это говорит о том, что в результате создания защитных лесонасаждений и использования покровных растений суммарное испарение влаги в атмосферу уменьшится, а значит, больше влаги будет оставаться в почве и использоваться растениями для транспирации и терморегулирования. При этом микроклимат станет более умеренным – уменьшатся суточные перепады температур, сократятся вероятности теплового стресса и заморозков для растений.

Таким образом, внедрение и использование на регулярной основе методов агролесоводства (устойчивой системы земледелия, сочетающей использование водоохраных и почвозащитных функций древесной растительности с агрономическими мерами), несомненно, будут способствовать обеспечению сельскохозяйственных культур необходимой почвенной влагой и противодействовать аномальному росту температуры почвы в летний период за счет повышения возможностей ее эвапотранспирационного регулирования.

Выводы. Рассчитанные значения индекса аридности для территории Гомельской обл. Беларуси за 2000–2022 гг. показывают, что в вегетационный период данный регион по международной классификации FAO относится к семиаридной зоне (потенциальное испарение в мае – июне превышает сумму атмосферных осадков более чем на 50 %).

Современное изменение климата на территории Гомельской обл. лучше всего согласуется с расчетами глобальных климатических моделей для одного из самых жестких сценариев антропогенного радиационного воздействия – SSP3–7.0 (рост среднегодовой глобальной температуры к концу столетия +4 °C по сравнению с доиндустриальным периодом). В данном сценарии ожидается рост средней температуры в Гомельской обл. в теплый период года на 3,3 °C уже к середине текущего столетия при почти неизменной сумме атмосферных осадков.

Влияние усиления засушливости климата на биоклиматические показатели и водный баланс земель Гомельской обл. исследованы на основе данных ДЗЗ. Показано, в период 2000–2023 гг. вегетационный индекс NDVI, характеризующий фотосинтетически активную биомассу, уменьшался на 64 % площади Гомельской обл., что свидетельствует о снижении биологической продуктивности земель в результате изменения климата. Транспирация растительности на землях сельскохозяйственного назначения преимущественно уменьшается – в среднем на 0,50 мм/год, что делает растения более уязвимыми перед волнами тепла и засухами. Одновременно с этим на 53 % общей площади пахотных земель Гомельской обл. отмечается положительный тренд испарения с почвы в вегетационный период – в среднем 0,19 мм/год.

Анализ изменений температуры и составляющих суммарного испарения на землях Гомельской обл. со статистически достоверным ($p < 0,01$) положительным трендом вегетационного индекса NDVI показал, что увеличение лесистости (за счет создания защитных лесополос и выращивания покровных растений) способно обеспечить снижение испарения с почвы на землях сельскохозяйственного назначения в среднем на 1,2 мм/год и увеличить транспирацию растений на 0,8 мм/год, что создаст положительный баланс почвенной влаги и повысит возможности естественной терморегуляции растений. Положительным фактором увеличения лесистости является и уменьшение внутрисуточных колебаний температуры, что снизит риски теплового стресса и заморозков для растений.

За счет экологической реабилитации земель также возможно повысить экосистемный нетто-сток CO₂, что будет важным шагом на пути выполнения Республикой Беларусь обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ (грант № Х23КУБ-010).

Список использованных источников

1. Лысенко, С. А. Особенности современного изменения климата в Республике Беларусь / С. А. Лысенко, И. В. Буяков // *Фундам. и приклад. климатология*. – 2020. – № 3. – С. 22–41.
2. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
3. Шкляр, А. Х. Климатические ресурсы Белоруссии и их использование в сельском хозяйстве / А. Х. Шкляр. – Минск: Выш. шк., 1973. – 430 с.
4. Изменения климата Беларуси и их последствия / В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск: Тонпик, 2003. – 330 с.
5. Шебеко, В. Ф. Влияние осушительных мероприятий на водный режим территорий / В. Ф. Шебеко. – Минск: Ураджай, 1983. – 200 с.
6. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // *Изв. РАН. Сер. геогр.* – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
7. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // *Исслед. Земли из космоса*. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
8. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // *Метеорология и гидрология*. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
9. Лысенко, С. А. Сеточный архив метеорологических данных Республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменений климата / С. А. Лысенко, В. Д. Чернышев, В. В. Коляда // *Природопользование*. – 2019. – № 1. – С. 17–27.
10. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) / R. Allen [et al.]. – Rome: FAO, 1998. – 333 p.
11. Biophysical applications of satellite remote sensing / J. M. Hanes [et al.]. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 230 p.
12. PML_V2 0.1.7: Coupled evapotranspiration and gross primary product [Electronic resource]. – Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2_v017(accessed 1 December 2021).
13. Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass / H. L. Penman // *Proc. R. Soc. London, Ser. A*. – 1948. – Vol. 193. – P. 120–145.
14. Monteith, J. Evaporation and environment / J. Monteith // *19th Symposia of the Soc. for Experimental Biol.* – 1965. – Vol. 19. – P. 205–234.
15. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation / R. Leuning [et al.] // *Water Resour. Res.* – 2008. – Vol. 44. – W10419. <https://doi.org/10.1029/2007WR006562>
16. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components / Y. Q. Zhang [et al.] // *Sci. Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 19124. <https://doi.org/10.1038/srep19124>
17. Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems / R. Gan [et al.] // *Ecohydrology*. – 2018. – Vol. 11. – e1974. <https://doi.org/10.1002/eco.1974>
18. Coupled estimation of 500-m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 / Y. Zhang [et al.] // *Remote Sens. Envir.* – 2019. – Vol. 222. – P. 165–182.
19. Gilbert, R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring* / R. O. Gilbert. – New York: Wiley, 1987. – 336 p.
20. Лысенко, С. А. Прямые и обратные связи между температурой подстилающей поверхности и листовым индексом на территории Беларуси в летний период / С. А. Лысенко // *Исслед. Земли из космоса*. – 2023. – № 1. – С. 1–16.

Поступила 04.04.2024

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**BIOLOGICAL RESOURCES****БІЯЛАГІЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

ISSN 1810-9810 (Print)
УДК 574.58

Б. В. Адамович, Т. М. Михеева, Р. З. Ковалевская, Т. В. Жукова, Н. В. Дубко, Ю. К. Верес

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: belaqualab@gmail.com*

**ТРОФИЧЕСКИЙ СТАТУС ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ
И ЕГО СВЯЗЬ С ОСНОВНЫМИ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ВОДОЕМОВ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР НАРОЧАНСКОГО РЕГИОНА, БЕЛАРУСЬ)**

Аннотация. Изучение трофического статуса и его связь с основными гидроэкологическими характеристиками водоемов проводили на 11 озерах Нарочанского региона в 2013–2023 гг., которые представляют собой водоемы в широком диапазоне трофности – от олиго-мезотрофных до высокоэвтрофных. Трофический статус водоемов оценивали по индексу трофического состояния Карлсона (Trophy State Index, TSI). Результаты исследований показали, что TSI является адекватным показателем трофического статуса. Средневзвешенная для всей толщи воды валовая первичная продукция и деструкция планктона демонстрировали сильную и статистически значимую связь с уровнем трофности водоемов, оцененным по TSI. Отмечена сильная связь содержания хлорофилла с концентрацией общего фосфора. Связь хлорофилла с концентрацией общего азота значительно слабее, т. е. в изученных озерах основным лимитирующим биогенным элементом для развития фитопланктона является фосфор. Не отмечено никакой связи содержания хлорофилла и TSI со средней температурой, а также концентрацией растворенного кислорода в гипolimнии. Оценка трофического статуса должна быть обязательным элементом проведения любых лимнологических исследований с целью формирования объективного представления о состоянии водного объекта.

Ключевые слова: озера, трофический статус, первичная продукция планктона, хлорофилл *a*, биогенные элементы, прозрачность, кислород

B. V. Adamowich, T. M. Mikheeva, R. Z. Kovalevskaya, T. V. Zhukova, N. V. Dubko, Yu. K. Veres

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: belaqualab@gmail.com

**TROPHIC STATE OF LAKE ECOSYSTEMS AND ITS RELATIONSHIP
WITH THE MAIN HYDROECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WATER BODIES:
A CASE STUDY OF THE LAKES OF NAROCHANSKY REGION (BELARUS)**

Abstract. The study of trophic status and its relationship with the main hydroecological characteristics of water bodies was conducted in the 11 lakes of the Narochansky region from 2013 to 2023. The studied lakes of the Narochansky region span a considerable range of trophic status, from oligo-mesotrophic to highly eutrophic. The trophic status of the water bodies was evaluated using the Carlson's Trophic State Index (TSI). The results of our research demonstrate that TSI is an adequate indicator of trophic status. The weighted average gross primary production and plankton decomposition for the entire water column demonstrate a strong and statistically significant relationship with the trophic level of the water bodies assessed by TSI. A strong correlation was observed between chlorophyll content and total phosphorus concentration. The correlation between chlorophyll and total nitrogen concentration is significantly weaker, indicating that phosphorus is the primary limiting nutrient for phytoplankton growth in the studied lakes. No correlation was found between chlorophyll content and TSI with average temperature, as well as dissolved oxygen concentration in the hypolimnion. The assessment of trophic status should be considered an obligatory component of any limnological research endeavor, aimed at establishing an objective understanding of the condition of a water body.

Keywords: lakes, trophic state, plankton primary production, chlorophyll *a*, nutrients, transparency, oxygen

Б. У. Адамовіч, Т. М. Міхеева, Р. З. Кавалёўская, Т. В. Жукава, М. У. Дубко, Ю. К. Верас

Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: belaqualab@gmail.com

**ТРАФІЧНЫ СТАТУС АЗЁРНЫХ ЭКАСІСТЭМ І ЯГО СВЯЗЬ З АСНОЎНЫМІ ГІДРАЭКАЛАГІЧНЫМІ
ХАРАКТАРЫСТЫКАМІ ВАДАЁМАЎ (НА ПРЫКЛАДЗЕ АЗЁР НАРАЧАНСКАГА РЭГІЁНА, БЕЛАРУСЬ)**

Анатацыя. Вывучэнне трафічнага статусу і яго сувязь з асноўнымі гідраэкалагічнымі характарыстыкамі вадаёмаў праводзілі на 11 азёрах Нарачанскага рэгіёна ў 2013–2023 гг., якія ўяўляюць сабой вадаёмы ў шырокім дыяпазоне трэфнасці – ад аліга-мезатрофных да высокаэвтрофных. Трафічны статус вадаёмаў ацэньвалі па індэксе трафічнага стану Карлсана (Trophy State Index, TSI). Вынікі даследаванняў паказалі, што TSI з'яўляецца адекватным паказчыкам трафічнага статусу. Сярэднеўзважаная для ўсёй тоўшчы вады валавая першасная прадукцыя і дэструкцыя планктону дэманстравалі моцную і статыстычна значную сувязь з узроўнем трэфнасці вадаёмаў, ацэненым па TSI. Адзначана моцная сувязь колькасці хлара-

філу з канцэнтрацыяй агульнага фосфару. Сувязь хларафілу з канцэнтрацыяй агульнага азоту значна слабей, гэта значыць у вывучаных азёрах асноўным біягенным элементам, які лімітуецца, для развіцця фітапланктону з'яўляецца фосфар. Не адзначана ніякай сувязі колькасці хларафілу і TSI з сярэдняй тэмпературай, а таксама канцэнтрацыяй растваранага кіслароду ў гіпалімініе. Ацэнка трафічнага статусу павінна быць абавязковым элементам правядзення любых лімналагічных даследаванняў з мэтай фарміравання аб'ектыўнага уяўлення аб стане воднага аб'екта.

Ключавыя словы: азёры, трафічны статус, першасная прадукцыя планктону, хларафіл а, біягенныя элементы, празрыстасць, кісларод

Введение. Трофический статус является ключевой гидроэкологической характеристикой водных объектов. Без его адекватной оценки невозможно понимание текущего состояния и перспектив развития водоема или водотока. Изучение трофического статуса водоемов, а также его связи со структурой и уровнем развития водных сообществ является одной из главных задач современной лимнологии и разрабатываемой в настоящее время теории функционирования водных экосистем. Понимание научных основ формирования трофического статуса является неременной основой эффективного и устойчивого использования ресурсов поверхностных вод.

Современный трофический статус каждого конкретного водоема определяет исторически сложившаяся совокупность таких географических и экологических факторов, как характер донных отложений, морфометрия озерной котловины, гидрохимический режим, структура и биогенная нагрузка на водосборную территорию [1, 2]. Измерение трофического статуса вытекает из концепции Э. Науманна об уровне продуктивности водной экосистемы [3]. Необходимость количественного выражения трофности нашла отражение в развитии и активном использовании индексов трофического состояния [4–6].

Трофический статус является интегральной характеристикой состояния озерной экосистемы и во многом определяет качество поверхностных вод. Проведение качественных и своевременных научных исследований, включающих в обязательном порядке оценку трофического статуса, является ключевой составляющей сохранения природной уникальности водных объектов. Без таких исследований невозможна адекватная оценка состояния и стадии эволюции водных экосистем. Динамичность водных экосистем предполагает регулярное проведение такого рода исследований в целях быстрой и адекватной реакции на какие-либо воздействия и позволит сохранить уникальность водного комплекса Беларуси.

Район исследований. Исследования проводили на озерах Нарочанского региона в 2013–2023 гг. Основные морфометрические показатели озер приведены в таблице. Пробы отбирали ежемесячно в глубоководной зоне озер в течение вегетационного сезона с мая по октябрь в озерах Нарочь, Мясстро и Баторино в 2013–2022 гг., в озере Большие Швакшты – в 2013–2015 и 2022 гг., в озере Белое – в 2013–2015 гг., в озере Малые Швакшты – в 2014–2015 гг., в озере Свирь – в 2018 и 2023 гг., в озерах Рудаково и Ходосы – в 2019 г., в озере Мядель – в 2022 г., в озере Вишневское – в 2023 г. Пробы воды отбирали при помощи двухлитрового батометра Рутнера на 3–6 горизонтах водного столба от поверхности до придонного слоя. Воду со всех горизонтов смешивали для получения интегральной пробы, отражающей средний состав озерной воды (объем воды каждого горизонта в интегральной пробе был пропорционален доле, которую составляет слой в общем объеме озера в соответствии с данными батиметрии).

Для определения первичной продукции и аэробной деструкции планктона применяли скляночный метод в кислородной модификации [7]. Измерения продукционных показателей проводили в пелагических зонах модельных водоемов в течение вегетационного сезона (май – октябрь) от поверхностного до придонного слоя на 7 горизонтах в озере Нарочь в 2013–2018 гг., 5 горизонтах в озере Мясстро в 2013 и 2017 гг., 4 горизонтах в озере Баторино в 2013 г., 5 горизонтах в озере Свирь в 2018 г., 4 горизонтах в озерах Большие Швакшты, Малые Швакшты и Белое в 2013 г., 4 горизонтах в озере Ходосы в 2019 г., 5 горизонтах в озере Рудаково в 2019 г. Значения продукционных показателей планктона рассчитывали двумя способами. В первом случае оценили продукционные показатели под m^2 . Вычисление проводили с помощью аппроксимации площади под кривой методом трапеций. Во втором случае показатель продукции и деструкции на определенном горизонте умножали на объем слоя воды, который занимает этот горизонт, и затем делили на весь объем воды в озере. Таким образом, мы получили средневзвешенное значение продукционных показателей планктона в единице объема воды для всего озера. Прозрачность воды (SD) определяли по стандартному белому диску Секки, содержание взвешенных веществ (SM) – гравиметрическим методом на мембранных фильтрах с диаметром пор 1,5 мкм. На этих же фильтрах оценивали содержание хлорофилла а без коррекции на присутствие феопигментов (Chl) спектрофотометрическим методом с экстракцией пигментов в 90%-м ацетоне [9]. Общее содержание азота (TN) определяли после окисления проб с персульфатом калия в автоклаве или с помощью элементного анализатора XPERT-TOC/TN_b (Trace Elemental Instruments, Netherlands), фосфора (TP) – после минерализации нефилтрованной воды с персульфатом калия в кислой среде на водяной бане.

Основные морфометрические показатели изученных озер [8]¹

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Глубина средняя, м	Глубина максимальная, м	Длина береговой линии, км	Объем воды, млн м ³	Площадь водосбора, км ²	Время полного водообмена, лет	Тип перемешивания	Координаты точек отбора проб
Баторино	6,25 (5,98)	2,4	5,5	15 (15,09)	18,7	92,5	1	Полимиктическое	26°58'4,313" E 54°53'8,905" N
Белое	1,95 (2,02)	2,9	8,1	6,02 (6,22)	5,71	4,72	–	Полимиктическое	26°51'33,66" E 54°49'53,46" N
Большие Швакшты	9,56 (9,23)	2,3	5,3	13,05 (12,6)	22,3	84,6	1–2	Полимиктическое	26°35'46,703" E 54°57'51,720" N
Вишневокое	9,97 (10,15)	2	6,3	13,6 (13,56)	19,79	56,2	1,5	Полимиктическое	26°34'20,340" E 54°43'17,400" N
Малые Швакшты	1,91	1,5	3,2	6,75	2,86	105	1	Полимиктическое	26°33'4,772" E 54°59'43,134" N
Мядель	16,2 (15,84)	6,3	26,4	30,92 (34,95)	102	89,9	5	Полимиктическое	26°52'34,426" E 54°56'5,940" N
Мястро	13,1 (13,36)	5,4	11,3	20,2 (24,0)	70,1	133,1	2,5	Полимиктическое	26°52'50,951" E 54°52'0,464" N
Нарочь	79,6 (80,08)	8,9	24,8	41 (44,2)	710	279	10–11	Полимиктическое	26°43'13,448" E* 54°53'8,905" N* 26°46'45,725" E** 54°51'9,867" N**
Рудаково	0,24 (0,23)	11,3	28,6	2,01 (2,1)	2,85	1,2	10–11	Димиктическое	26°53'29,884" E 54°53'54,172" N
Свирь	22,28 (22,3)	4,7	8,7	31,15 (32,76)	104,26	364,3	1,5	Полимиктическое	26°28'5,820" E 54°48'27,120" N
Ходосы	0,1	3,6	9,3	1,65 (1,7)	0,36	0,9	–	Полимиктическое (макрофитное)	26°52'6,688" E 54°58'6,849" N

* – озеро Нарочь (малый плес); ** – озеро Нарочь (большой плес)

¹ В скобках приведены величины согласно ГИС Национального парка «Нарочанский».

Общее содержание органического углерода (ТС) определяли методом бихроматной окисляемости или как нелетучий органический углерод (NPOC) с помощью элементного анализатора XPERT-TOC/TN_b (Trace Elemental Instruments, Netherlands). Минеральные формы азота и фосфора определяли в фильтрованной воде фотоколориметрическими методами [10, 11]. Содержание растворенного в воде кислорода определяли методом Винклера либо с помощью оптического оксиметра Orion Star (Thermo Scientific, USA). Температуру измеряли, используя глубоководный термометр. Подробное описание методов и баз данных по изученным озерам приведено в [12].

Трофический статус водоемов оценивали по индексу, предложенному Р. Карлсоном [4]. Индекс трофического состояния (Trophy State Index, TSI) рассчитывали по каждому из предложенных Карлсоном параметров (прозрачность по диску Секки, концентрации хлорофилла *a* и общего фосфора) по формулам, описывающим логарифмические кривые изменения индекса [6]. В качестве интегрированного значения (TSI) взяли среднее из трех рассчитанных индексов.

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с использованием программных пакетов R [13].

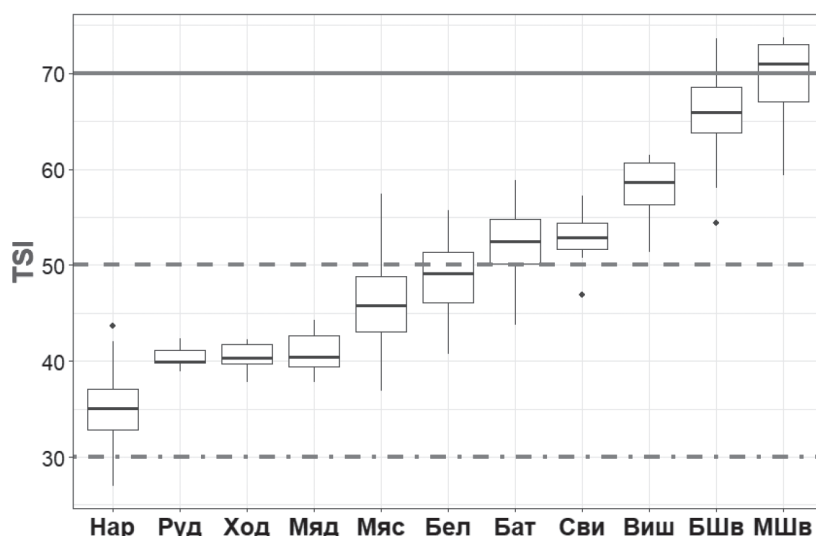


Рис. 1. Уровень трофности изученных озер в соответствии с TSI; Нар – озеро Нарочь, Руд – озеро Рудаково, Ход – озеро Ходосы, Мяд – озеро Мядель, Мяс – озеро Мястро, Бел – озеро Белое, Бат – озеро Баторино, Сви – озеро Свирь, Виш – озеро Вишневское, БШв – озеро Большие Швакшты, МШв – озеро Малые Швакшты (линия в «коробочке» показывает медианное значение показателя за весь период наблюдений, границы «коробочки» – 25 и 75 квартили, «усы» – 25 и 75 квартили +1,5 × интерквартильный размах, точки – выбросы за «усы»; штрихпунктирной линией обозначена условная граница олиготрофной и мезотрофной зон, штриховой линией – мезотрофной и эвтрофной зон, сплошной линией – эвтрофной и высокоэвтрофной зон)

Результаты и их обсуждение. Изученные озера Нарочанского региона представляют собой водоемы широкого диапазона трофности – от олиго-мезотрофных до высокоэвтрофных (рис. 1). Экосистемы озер, находящиеся выше и на границе эвтрофной зоны, испытывают сильную и устойчивую биогенную нагрузку.

Средневзвешенное значение валовой первичной продукции и деструкции планктона демонстрируют сильную и статистически значимую связь с уровнем трофности водоемов, оцененным по TSI (рис. 2). Не отмечено связи чистой первичной продукции, представляющей собой разницу между валовой продукцией и аэробной деструкцией, с TSI (см. рис. 2). При этом рассчитанные нами продукционно-деструкционные показатели планктона под м² значительно меньше связаны с TSI при коэффициентах аппроксимации регрессионных моделей (r^2) – от 0,056 до 0,260.

В наших исследованиях отмечена сильная связь содержания хлорофилла (Chl) с концентрацией общего фосфора (TP). Связь хлорофилла с концентрацией общего азота (TN) значительно слабее, т. е. очевидно, что в изученных озерах основным лимитирующим биогенным элементом для развития фитопланктона является фосфор. При этом не выявлено связи хлорофилла с концентрацией минерального фосфора (PO₄), в то время как с концентрацией минерального азота (N_{miner}) отмечена статически значимая связь (рис. 3).

Концентрация хлорофилла демонстрирует сильную связь с содержанием общего органического углерода (ТС) и БПК₅ (BOD₅). Эта связь в данном случае обуславливается тем, что основная биомасса

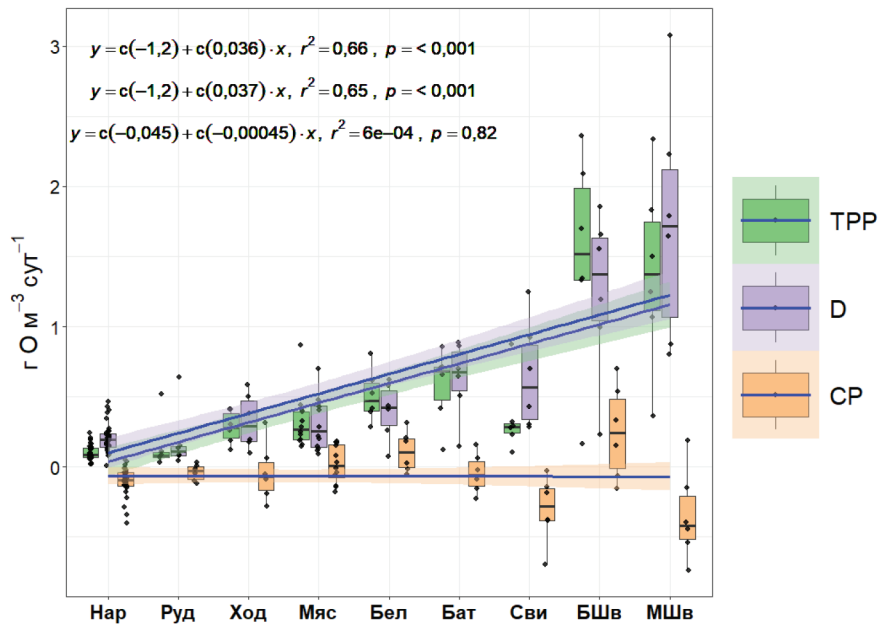


Рис. 2. Валовая первичная продукция (TPP), деструкция (D) и чистая продукция (CP) планктона в средневзвешенном объеме воды озер (озера расположены в порядке возрастания трофического статуса; уравнения и линии регрессии сверху вниз соответствуют TPP, D, CP; линия в «коробочке» показывает медианное значение показателя, границы «коробочки» – 25 и 75 квантили, «усы» – 25 и 75 квантили +1,5 × интерквантильный размах, точки – значения наблюдений)

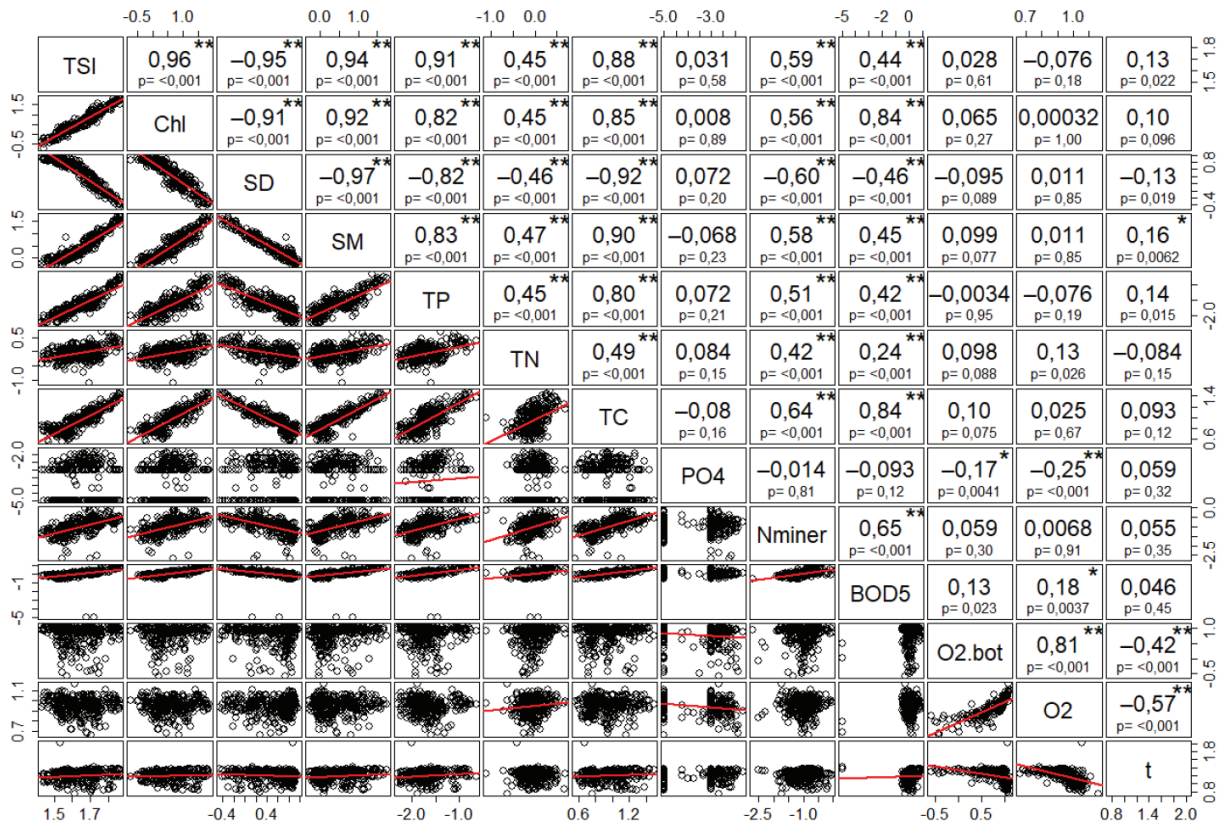


Рис. 3. Коэффициенты корреляции Пирсона (в правой верхней части) и линии сглаживания на диаграммах рассеяния (в левой нижней части) для гидроэкологических показателей изученных озер (уровень значимости (p) составляет: *p < 0,01; **p < 0,001; значение показателей логарифмированы по основанию 10; к нулевым значениям показателя перед логарифмированием прибавляли 0,001)

живых организмов как источников органического вещества, особенно в более эвтрофных озерах, представлена организмами фитопланктона (см. рис. 3).

Коэффициенты корреляции между прозрачностью воды по диску Секки (SD) и содержанием хлорофилла показывают фактически функциональную зависимость между этими показателями, из чего следует, что прозрачность воды является хорошим показателем трофического статуса изученных водоемов (см. рис. 3).

Не отмечено никакой связи содержания хлорофилла и TSI со средней температурой (t), а также средней концентрацией растворенного кислорода (O2) в столбе воды гипolimниона и его придонном слое (O2.bot). Это говорит о проблематичности, и даже невозможности, оценки трофического статуса по этим показателям (см. рис. 3).

Связь содержания общего фосфора и хлорофилла отчетлива видна при анализе большого массива данных по водоемам разной трофности (рис. 4). Однако если оценить связь хлорофилла с фосфором в каждом конкретном водоеме, эта связь будет не такой очевидной. На рис. 4 видно, что только для двух водоемов из 11 уровень значимости регрессионной модели (p) превышает 0,01. Сходная картина отмечена с общим азотом с той лишь разницей, что не видно выраженной тенденции связи содержания общего азота и хлорофилла в отдельных водоемах (рис. 5). Для минерального фосфора не установлено связи с хлорофиллом ни для общего массива данных, ни для каждого озера в отдельности (рис. 6).

Концентрация растворенного кислорода часто рассматривается как важный фактор, связанный с трофическим статусом водоемов. Наши данные показывают, что такой связи нет ни для массива данных по всем озерам, ни для каждого озера в отдельности (рис. 7).

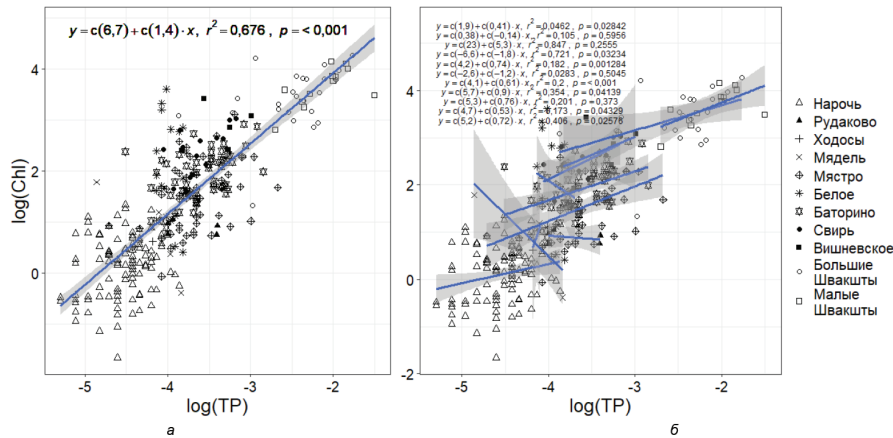


Рис. 4. Связь содержания общего фосфора в мг/л (TP) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

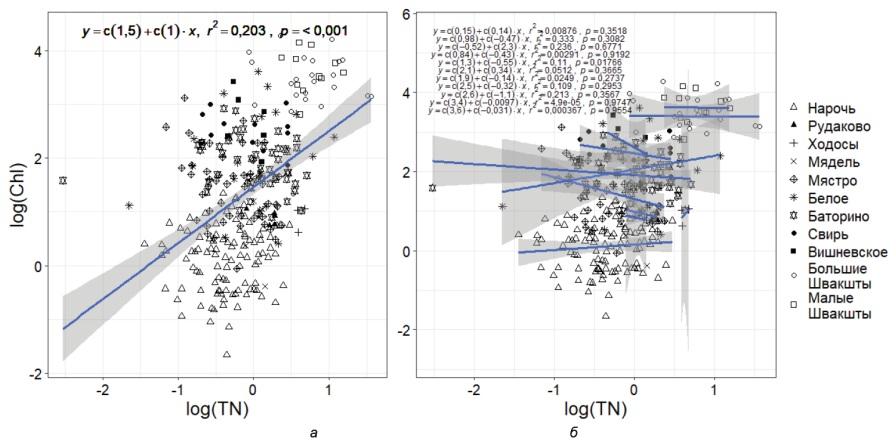


Рис. 5. Связь содержания общего азота в мг/л (TN) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

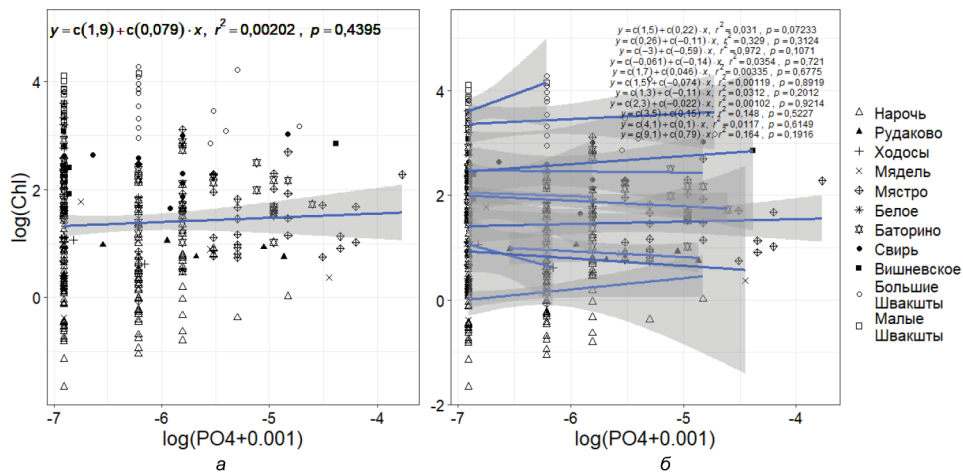


Рис. 6. Связь содержания минерального фосфора в мг/л (PO4) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

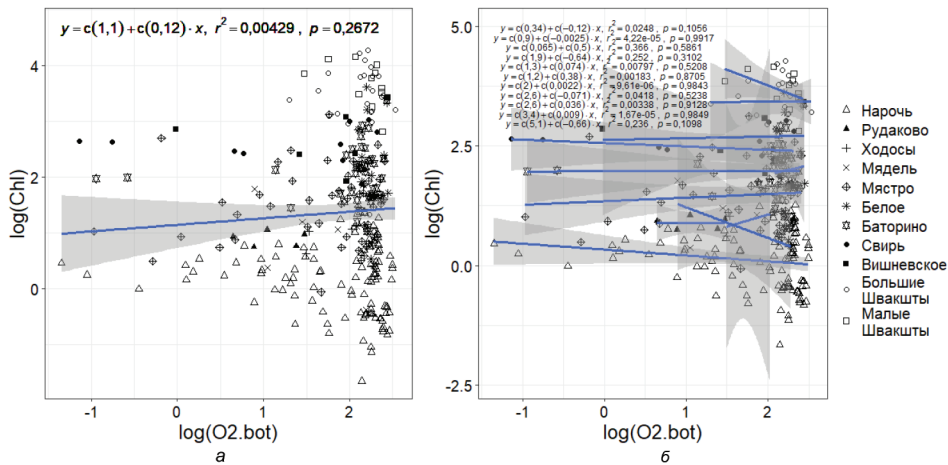


Рис. 7. Связь содержания растворенного кислорода в придонном слое гипolimниона в мг/л (O2.bot) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

Трофический статус является интегральным показателем и определяется географическими и экологическими параметрами: морфометрией озерной котловины, характером донных отложений, гидрохимическим режимом, биогенной нагрузкой на территорию водосбора и др. В свою очередь, трофический статус непосредственно связан со структурой и уровнем развития водных биологических сообществ [1, 6, 14–17]. Изучение трофического состояния водных объектов, а также выявление связей трофического статуса с развитием водных сообществ остаются одной из главных задач современной лимнологии и основой эффективного и устойчивого использования ресурсов поверхностных вод.

Исследования, связанные с трофностью водоемов, не теряют своей актуальности, несмотря на фактически столетний юбилей концепции трофического статуса водных экосистем, предложенной шведским лимнологом Э. Науманном [18]. В основе терминологии своей концепции Э. Науманн применил термины, которые К. Вебер [19] использовал для классификации содержания питательных веществ в болотах. Э. Науманн основал свою трофическую классификацию на продуктивности фитопланктона. По Э. Науманну, олиготрофные озера – это озера с низкой продуктивностью, никогда не приводящие к окрашиванию или даже помутнению воды. В эвтрофных озерах продуктивность достигает очень высоких значений, вода по большей части очень сильно замутнена или даже полностью окрашенная [3]. А. Тинеманн одновременно с Э. Науманном разработал схему классификации, основанную на видах бентосных организмов в озерах и концентрации кислорода в гипolimнионе [20]. На раннем этапе развития концепции в связи с ограниченностью данных натуральных наблюдений объединение этих двух классификаций

представлялось разумным. Однако, как подчеркивал Э. Науманн, трофическая классификация основана на продукции, а не на факторе, определяющем ее. Он считал азот и фосфор основными факторами, определяющими биологическую продуктивность водоемов [3].

Проблема изменения трофического состояния водных объектов особенно обострилась во второй половине XX в., когда процессы эвтрофирования, т. е. повышения продуктивности водных экосистем преимущественно под действием антропогенных факторов, приобрели глобальный характер. Бесспорная важность вопросов, связанных с эвтрофированием и ухудшением качества воды, обусловила актуальность адекватной оценки трофического статуса водных объектов. Необходимость количественного выражения трофности нашло отражение в развитии и активном использовании TSI [4, 5]. Результаты наших исследований трех озер Нарочанского региона за период 1978–2014 гг. [6], а также установленная в рамках данной работы сильная связь первичной продукции планктона с TSI (см. рис. 2), показали, что индекс трофического состояния, предложенный Р. Карлсоном [4], является адекватным показателем трофического статуса. Оценки, сделанные при расчете индекса по различным показателям (прозрачность, хлорофилл, общий фосфор), сопоставимы между собой и позволяют получать сравнимые оценки трофности даже при наличии только одного имеющегося показателя [6].

Многолетняя дискуссия о биогенных элементах, лимитирующих развитие фитопланктона в пресных водоемах, была разрешена в пользу фосфора во многом благодаря работам Р. Фолленвайдера [21, 22]. Серия его работ подтвердила идею о том, что трофическое состояние напрямую связано с фосфорной нагрузкой с водосбора. Связь концентрации фосфора с содержанием в воде хлорофилла *a* показана в пространственном аспекте как в региональном [23–27], так и в глобальном масштабе [28]. При этом отмечено, что для разнотипных водоемов характерна не линейная, а сигмоидальная связь [28, 29]. В наших исследованиях установлена четкая зависимость увеличения концентрации хлорофилла и, следовательно, повышения трофического статуса изученных озер с увеличением концентрации общего фосфора (см. рис. 4). Связь концентрации хлорофилла с содержанием общего азота гораздо слабее (см. рис. 5), при том, что она все равно является статистически значимой. Однако, по нашему мнению, ориентироваться на уровень значимости (*p*) при большом количестве наблюдений не всегда целесообразно, особенно при низких коэффициентах корреляции.

Не отмечено связи концентрации минерального фосфора с содержанием хлорофилла (см. рис. 6). Это неудивительно, ведь минеральные формы биогенных элементов представляют собой фактически неусвоенный ресурс для фитопланктона, а низкие концентрации фосфора и азота могут быть как следствием низкой биогенной нагрузки, так и следствием интенсивного потребления их фитопланктоном. Следовательно, низкие концентрации минеральных форм биогенных элементов могут быть отмечены и в низкотрофном и в высокотрофном водоемах. Низкие значения (вплоть до порога определения) минерального фосфора, часто регистрируемые в изученных нами озерах, как раз свидетельствуют о его дефиците и, соответственно, лимитировании развития фитопланктона по этому биогенному элементу. Отмеченная корреляция хлорофилла с содержанием минерального азота обусловлена, по всей видимости, не прямым лимитированием развития фитопланктона по этому элементу, а общей тенденцией увеличения содержания биогенных элементов с ростом трофического статуса водоемов.

Связь содержания фосфора с хлорофиллом в каждом из изученных нами озер (см. рис. 4) представляет фактически связь этих показателей в сезонной динамике, и именно эту связь проследить крайне сложно. Это говорит о том, что практически невозможно установить связи отдельных показателей с трофическим статусом в рамках изучения одного озера и без данных за полный вегетационный сезон. Если пространственная связь и связь в многолетней динамике при наличии выраженного тренда между содержанием фосфора и развитием фитопланктона показана довольно хорошо [26, 30, 31], то сезонная связь концентрации фосфора с уровнем развития фитопланктона либо не отражается в работах, либо не является значимой [30, 32]. Сезонная динамика азота и фосфора может быть очень вариабельна в течение сезона, при этом концентрация фосфора в воде увеличивается в летний период [23, 30, 33]. Концентрация фосфора определяется внешней и внутренней нагрузками [24, 33], и их сочетание может создавать различные варианты сезонной динамики фосфора. На внутреннюю динамику также влияет ряд факторов, интенсивность воздействия которых специфична для отдельных водоемов [34]. Разница в сезонной динамике фосфора и хлорофилла может быть вызвана рядом причин. Основной из них, по-видимому, является смена лимитирующего элемента с азота на фосфор, которая часто наблюдается в течение сезона [23, 35] при увеличении концентрации фосфора и снижении концентрации азота. Кроме того, высокие концентрации нитратов могут негативно действовать на фитопланктон и уменьшать концентрацию хлорофилла при высоких концентрациях фосфора и азота [36].

В основе концепции трофического статуса Э. Науманна лежат характеристики первичных планктонных продуцентов либо тесно с ними связанные гидробиологические или гидрохимические показатели, такие как содержание в воде хлорофилла, фосфора, азота, биомасса фитопланктона. В то же время

существуют аргументы в пользу необходимости использования показателей гетеротрофных сообществ для оценки трофического статуса водных экосистем, так как в пищевые сети включается не только органическое вещество, синтезированное в водоеме в процессе фотосинтеза, но и аллохтонная органика [1]. Нами было показано, что повышение трофического статуса озер Нарочь, Мясро и Баторино сопровождается увеличением в них численности гетеротрофного бактериопланктона [16]. При этом установлена обратная зависимость между трофическим статусом и численностью и биомассой макрозообентоса в трех озерах Нарочанского региона, т. е. для некоторых озер снижение трофического статуса приводит к увеличению обилия макробентоса, вероятно, из-за улучшения среды обитания донных животных [17].

В то же время индексы, численно отражающие трофический статус, не являются абсолютным показателем истинного трофического статуса водоема. Индекс характеризует текущее состояние показателей, выбранных для оценки трофического статуса в конкретный момент времени, в то время как трофический статус – это состояние водоема на конкретном историческом этапе развития его экосистемы, которое определяется возможностью водоема производить первичную продукцию планктона, а также реализацией этой возможности [37]. Так, единичные «цветения» фитопланктона могут наблюдаться в слабоэвтрофных водоемах [38]. Если отбор проб придется на этот момент, может сложиться ложное впечатление о высокой трофности водоема. Возможным решением этой проблемы и наиболее приемлемым вариантом приближения оценки трофического статуса с помощью численных индексов к реальному состоянию водоема могут быть относительно долговременные наблюдения за его состоянием как минимум в течение всего вегетационного сезона, а лучше нескольких сезонов. Кроме того, полезные сведения для приближения оценки трофического статуса к его реальному состоянию могут дать наблюдения за показателями, новыми для оценки трофического статуса. Так, на основании 20-летних наблюдений было показано, что относительно постоянная сезонная динамика гетеротрофного бактериопланктона позволяет адекватно оценить трофический статус водоема на основании данных за отдельные периоды [16].

Еще одним фактором, способным отразиться на адекватности оценки трофического статуса, может быть интенсивное развитие макрофитов [39, 40], которые конкурируют в водоеме за биогенные элементы с фитопланктоном. В этом случае выходом может стать принятие постулата, что трофность рассматривается как состояние водной толщи, т. е. в понимании, близком к пониманию Э. Науманна. Если под трофностью рассматривать всю первичную продукцию озера, включая макрофиты, микрофитобентос и перифитон, показатель трофического статуса при рассмотрении его связи с составом, структурой и функционированием биологических сообществ теряет смысл. Характеристику состояния макрофитного сообщества целесообразно приводить отдельно от оценки трофического статуса водоема.

Таким образом, несмотря на столетнюю историю, концепция трофического статуса не утратила своей актуальности и требует дальнейшего развития с помощью выявления как эмпирических, так и теоретических закономерностей. Оценка трофического статуса должна быть обязательным элементом проведения любых лимнологических исследований с целью формирования объективного представления о состоянии водного объекта. Наиболее приемлемым показателем для оценки трофического статуса в настоящее время является TSI, при этом отдельно должны приводиться сведения об интенсивности зарастания водоема макрофитами.

Благодарности. Авторы благодарят всех сотрудников НИЛ гидроэкологии и Нарочанской биологической станции, которые в разные годы участвовали в сборе и обработке материала. Финансовая поддержка некоторых стадий мониторинговых наблюдений осуществлялась в рамках грантов БРФФИ и Министерства образования Беларуси (включая задания ГПНИ ГР № 20212317 и № 20212395).

Список использованных источников

1. *Dodds, W. K.* Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs / W. K. Dodds, J. J. Cole // *Aquat. Sci.* – 2007. – № 69. – P. 427–439. <https://doi.org/10.1007/s00027-007-0922-1>
2. *Каратаев, А. Ю.* Факторы, влияющие на макрозообентос озер Беларуси / А. Ю. Каратаев, В. М. Самойленко, Л. Е. Бурлакова // *Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: материалы Междунар. науч. конф.*, (Минск – Нарочь, 20–25 сент. 1999 г. / сост. и общ. ред. Т. М. Михеева. – Минск: БГУ, 2000. – С. 123–130.
3. *Naumann, E.* Ziel und Hauptprobleme der regionalen Limnologie. *Botaniska Notiser* / E. Naumann. – Lund, 1927. – P. 81–103.
4. *Carlson, R. E.* A trophic state index for lakes / R. E. Carlson // *Limnol. Oceanogr.* – 1977. – № 11. – P. 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
5. *Kratzer, C. R.* A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida Lakes / C. R. Kratzer, P. L. Brezonik // *Water Resour. Bull.* – 1981. – Vol. 17. – P. 713–715. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1982.tb03982.x>
6. Long-term variations of the trophic state index in the Narochansk lakes and its relation with the major hydroecological parameters / B. V. Adamovich [et al.]. – *Water Resour.* – 2016. – Vol. 43. – P. 809–817. <https://doi.org/10.1134/S009780781605002X>
7. *Винберг, Г. Г.* Первичная продукция водоемов / Г. Г. Винберг. – Минск: Изд-во АН БССР, 1960. – 329 с.
8. *Озера Беларуси: справочник* / Б. П. Власов [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2004. – 284 с.

9. Kovalevskaya, R. Z. Modification of the method of spectrophotometric determination of chlorophyll a in the suspended matter of water bodies / R. Z. Kovalevskaya, H. A. Zhukava, B. V. Adamovich // *J. Appl. Spectrosc.* – 2020. – Vol. 87, iss. 1. – P. 72–78. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00965-9>
10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 541 с.
11. *Wetzel, R. G. Limnological analysis* / R. G. Wetzel, G. E. Likens. – 3rd ed. – New York, 2000. – 429 с.
12. База данных гидроэкологического мониторинга Нарочанских озер (Беларусь) / Б. В. Адамович [и др.] // *Эксперим. биология и биотехнология.* – 2024. – № 1. – С. 66–76.
13. R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.R-project.org>. – Date of access: 22.10.2023.
14. *Wetzel, R. G. Limnology. Lake and river ecosystems (3rd ed.)* / R. G. Wetzel. – New York: Academic, 2001. – 1024 p.
15. *Schindler, D. W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication* / D. W. Schindler // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – Vol. 51, № 1, part 2. – P. 356–363. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356
16. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring / B. V. Adamovich [et al.] // *Ecolog. Indic.* – 2019. – № 97. – P. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.049>
17. Temporal and spatial distribution of macrozoobenthos in three lakes of different trophic states: a case study of the Narochianskie lakes (Belarus) / B. V. Adamovich [et al.] // *Hydrobiol.* – 2023. – Vol. 851. – P. 1335–1351. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05395-0>
18. *Naumann, E. Some aspects of the ecology of the limnoplankton, with special reference to the phytoplankton* / E. Naumann // Translation from: *Svensk Botanisk Tidskrift.* – 1919. – Vol. 13, № 2. – P. 129–163.
19. *Hutchinson, G. E. Eutrophication, past and present* // *Eutrophication: causes, consequences, correctives* / G. E. Hutchinson. – Washington, DC: The National Academies Press, 1969. – 670 p.
20. *Thienemann, A. Tropische Seen und Seetypenlehre* / A. Thienemann // *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 1926. – № 9. – P. 205–231.
21. *Vollenweider, R. A. The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors* / R. A. Vollenweider // *Tech. Rep. OEKD, DAS (DSZ).* – 1968. – Vol. 27. – P. 1–182.
22. *Vollenweider, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication* / R. A. Vollenweider // *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiol.* – 1976. – Vol. 33. – P. 53–83.
23. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover / M. Søndergaard [et al.] // *Hydrobiol.* – 2017. – Vol. 795. – P. 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3110-x>
24. Seasonal dynamics in the concentrations and retention of phosphorus in shallow Danish lakes after reduced loading / M. Søndergaard [et al.] // *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* – 2002. – Vol. 5, № 1. – P. 19–29. <https://doi.org/10.1080/14634980260199936>
25. Relationships between chlorophyll-a, phosphorus and nitrogen as fundamentals for controlling phytoplankton biomass in lakes / D. Magumba [et al.] // *Environ. Control Biol.* – 2013. – Vol. 51, № 4. – P. 179–185. <https://doi.org/10.2525/ecb.51.179>
26. *Smith, V. H. Chlorophyll-phosphorus relations in individual lakes. Their importance to lake restoration strategies* / V. H. Smith, J. Shapiro // *Environ. Sci. Technol.* – 1981. – Vol. 15, № 4. – P. 444–451. <https://doi.org/10.1021/es00086a009>
27. *Pothoven, S. A. Seasonal patterns for Secchi depth, chlorophyll a, total phosphorus, and nutrient limitation differ between nearshore and offshore in Lake Michigan* / S. A. Pothoven, H. A. Vanderploeg // *J. Great Lakes Res.* – 2020. – Vol. 46, № 3. – P. 519–527.
28. Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide / R. Quinlan [et al.] // *Limnol. Oceanogr.* – 2021. – Vol. 66. – P. 392–404. <https://doi.org/10.1002/lno.11611>
29. *McCauley, E. Sigmoid relationships between nutrients and chlorophyll among lakes* / E. McCauley, J. A. Downing, S. Watson // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* – 1989. – Vol. 46, № 7. – P. 1171–1175. <https://doi.org/10.1139/f89-152>
30. *Søndergaard, M. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes* / M. Søndergaard, J. P. Jensen, E. Jeppesen // *Freshwater Biol.* – 2005. – Vol. 50. – P. 1605–1615. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01412.x>
31. Temporal and seasonal trends in nutrient dynamics and biomass measures in lakes Michigan and Ontario in response to phosphorus control / T. H. Johengen [et al.] // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1994. – Vol. 51, № 11. – P. 2570–2578. <https://doi.org/10.1139/f94-257>
32. Seasonal water quality and algal responses to monsoon-mediated nutrient enrichment, flow regime, drought, and flood in a drinking water reservoir. *int.* / M. Mamun [et al.] – *J. Environ. Res. Public Health.* – 2021. – Vol. 18. – P. 10714. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010714>
33. *Søndergaard, M. Lake Søbygaard, Denmark: Phosphorus dynamics during the first 35 years after an external loading reduction.* i AD Steinman & BM Spears (red), *Internal phosphorus loading in lakes: causes, case studies, and management* / M. Søndergaard, E. Jeppesen // *Internal phosphorus loading in lakes: causes, case studies, and management* / A. D. Steinman, B. M. Spears (eds.). – Florida: J. Ross Publishing, 2020. – P. 285–299.
34. *Anderson, J. Ecological effects of reduced nutrient loading (oligotrophication) on lakes: an introduction* / J. N. Anderson, E. Jeppesen, M. Søndergaard // *Freshwater Biol.* – 2005. – Vol. 50. – P. 1589–1593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01433.x>
35. Rethinking the role of nitrogen and phosphorus in the eutrophication of aquatic ecosystems / A. Smyth [et al.] // *EDIS.* – 2022. – Vol. 1. <https://doi.org/10.32473/edis-sg118-2022>
36. *Filstrup, C. T. Relationship of chlorophyll to phosphorus and nitrogen in nutrient-rich lakes* / C. T. Filstrup, J. A. Downing // *Inland Waters.* – 2017. – Vol. 7, № 4. – P. 385–400. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1375176>
37. The main factor determining the dynamics of the lake ecosystem under excessive nutrient loading (a case study on the Naroch Lakes) / T. I. Kazantseva [et al.] // *Contemp. Probl. Ecol.* – 2019. – Vol. 12, № 6. – P. 544–561. <https://doi.org/10.1134/S1995425519060052>
38. Cyanobacterial blooms in oligotrophic lakes: Shifting the high-nutrient paradigm / K. L. Reinl [et al.] // *Freshwater Biol.* – 2021. – Vol. 66. – P. 1846–1859. <https://doi.org/10.1111/fwb.13791>
39. Phytoplankton of Lake Bol'shie Shvakshty (Belarus) during the Shift of the Ecosystem from a Macrophyte–Weakly Eutrophic to a Phytoplankton–Hypereutrophic State / T. M. Mikheyeva [et al.] // *Contemp. Probl. Ecol.* – 2018. – Vol. 11. – P. 563–575. <https://doi.org/10.1134/S1995425518060057>
40. *Carlson, R. E. A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods* / R. E. Carlson, J. Simpson. – North American Lake Management Society, 1996. – 96 p.

Поступила 04.03.2024

А. И. Ковалевич, А. П. Кончиц, А. П. Сачек*Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь,
e-mail: forinstnanb@gmail.com***ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СНИЖЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ХВОЙНЫХ ПОРОД БЕЛАРУСИ**

Аннотация. Выявлены эколого-климатические факторы снижения устойчивости хвойных пород, влияющие на сокращение водообеспеченности хвойных насаждений ввиду изменения температурного и гидрологического режимов в холодное время года. Показана высокая значимая отрицательная корреляционная зависимость весеннего стока и средней температуры вневегетационного периода. Повышение средней температуры холодного времени года обуславливает повышенный сток во вневегетационный период и, как следствие, падение уровня грунтовых вод и низкую влагообеспеченность древесных растений в вегетационный. Низкая влагообеспеченность вызывает снижение устойчивости хвойных насаждений, приводит к их массовому усыханию и сукцессионному замещению лиственными видами.

Ключевые слова: глобальное потепление климата, изменение гидрологического режима, снижения устойчивости, массовое усыхание хвойных насаждений

A. I. Kovalevich, A. P. Konchits, A. P. Sachek*Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus,
e-mail: forinstnanb@gmail.com***ECOLOGICAL AND CLIMATIC FACTORS OF DECREASING STABILITY OF CONIFEROUS SPECIES OF BELARUS**

Abstract. An ecological and climatic mechanism for reducing the resistance of coniferous species has been identified. This consists of reducing the water supply of coniferous plantations due to changes in temperature and hydrological regimes during the cold season. A high significant negative correlation was observed between spring runoff and the average temperature of the non-growing season. An increase in the average temperature of the cold period of the year causes increase in runoff during the non-growing season, which in turn causes a decline in groundwater levels and a reduction in moisture availability for woody plants during the growing season. A reduction in moisture availability causes a decrease in the stability of coniferous plantations, which subsequently experience extensive drying and the subsequent replacement by deciduous species.

Key words: global warming, changes in hydrological regime, decreased stability, massive drying out of coniferous plantations

А. І. Кавалевіч, А. П. Кончыц, А. П. Сачок*Інстытут лесу Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Гомель, Беларусь,
e-mail: forinstnanb@gmail.com***ЭКОЛАГА-КЛІМАТЫЧНЫЯ ФАКТАРЫ ЗНІЖЭННЯ СТАБІЛЬНАСЦІ ХВОЙНЫХ ПОРОД БЕЛАРУСІ**

Анотацыя. Выяўлены экалага-кліматычныя фактары зніжэння ўстойлівасці хвойных парод, якія ўплываюць на скарачэнне водазабеспечанасці хвойных насаджэнняў з прычыны змены тэмпературнага і гідралагічнага рэжымаў у халодны сезон года. Паказана высокая значная адмоўная карэляцыйная залежнасць вясновага сцёку і сярэдняй тэмпературы паза-вегетацыйнага перыяду. Павышэнне сярэдняй тэмпературы халоднага сезону года абумоўлівае павышаны сцёк у паза-вегетацыйны перыяд і, як следства, падзенне ўзроўню грунтавых вод і нізкую вільгацезабеспечанасць дрэвавых раслін у перыяд вегетацыі. Нізкая вільгацезабеспечанасць выклікае зніжэнне ўстойлівасці хвойных насаджэнняў, прыводзіць да іх масавага ўсыхання і сукцэсійнага замяшчэння ліставымі відамі.

Ключавыя словы: глабальнае пацяпленне клімату, змена гідралагічнага рэжыму, зніжэнне ўстойлівасці, масавае ўсыханне хвойных насаджэнняў

Введение. Леса являются одним из основных возобновляемых природных ресурсов, имеют большое значение для устойчивого социально-экономического развития страны, служат важным климатообразующим фактором. В Республике Беларусь лесистость территории составляет 40,2 %. В видовом составе лесов Беларуси преобладают хвойные виды: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – 48,3 % и ель европейская (*Picea abies* L. Karst.) – 9,0 % лесопокрытой площади [1].

Основной экологической проблемой состояния лесов и растительного мира последних десятилетий стало массовое усыхание древостоев сосны обыкновенной и ели европейской, что связано с изменением климатических условий, сопровождавшихся интенсивным размножением стволовых вредителей и распространением болезней леса. В 2018 г. площадь погибших насаждений достигла максимальной величины за весь период ведения статистики – 50,0 тыс. га [2].

Периодическое массовое усыхание хвойных насаждений (рис. 1, 2) обусловлено абиотическими (повышение среднесуточной температуры воздуха, снижение количества атмосферных осадков и уров-

ня грунтовых вод в вегетационный период, увеличение площади ветровальных и буреломных лесных участков), биотическими (наличие хронических очагов грибных болезней, циклические вспышки размножения насекомых-вредителей, появление агрессивных видов и гибридов патогенов и вредителей, изменение ареала местопроизрастания хвойных видов) и антропогенными (несвоевременное проведение санитарно-оздоровительных и лесозащитных мероприятий, создание лесных монокультур, нарушение функционирования гидролесомелиоративной сети) факторами [3–5].

На территории Беларуси в 2016–2022 гг. площадь сплошных санитарных рубок усохших сосновых насаждений составила 115 тыс. га. Более половины всего объема было выявлено в юго-восточной части Беларуси.

Наблюдающиеся в последние годы и прогнозируемые в дальнейшем изменения климатических условий, возникающие очаги размножения стволовых вредителей и заболеваний, другие неблагоприятные факторы наносят значительный ущерб хвойным лесам, приводя к снижению биологической устойчивости древостоев и их усыханию. Последнее массовое усыхание ельников Беларуси началось в 1993 г. и наблюдалось почти непрерывно на протяжении 20 лет. Только в период 1996–2013 гг. санитарными рубками было вырублено более 29 млн м³ древесины *P. abies* на площади 302 тыс. га [3].



а



б

Рис. 1. Массовое усыхание хвойных насаждений:
а – короедное усыхание соснового насаждения; б – шестизубчатый короед

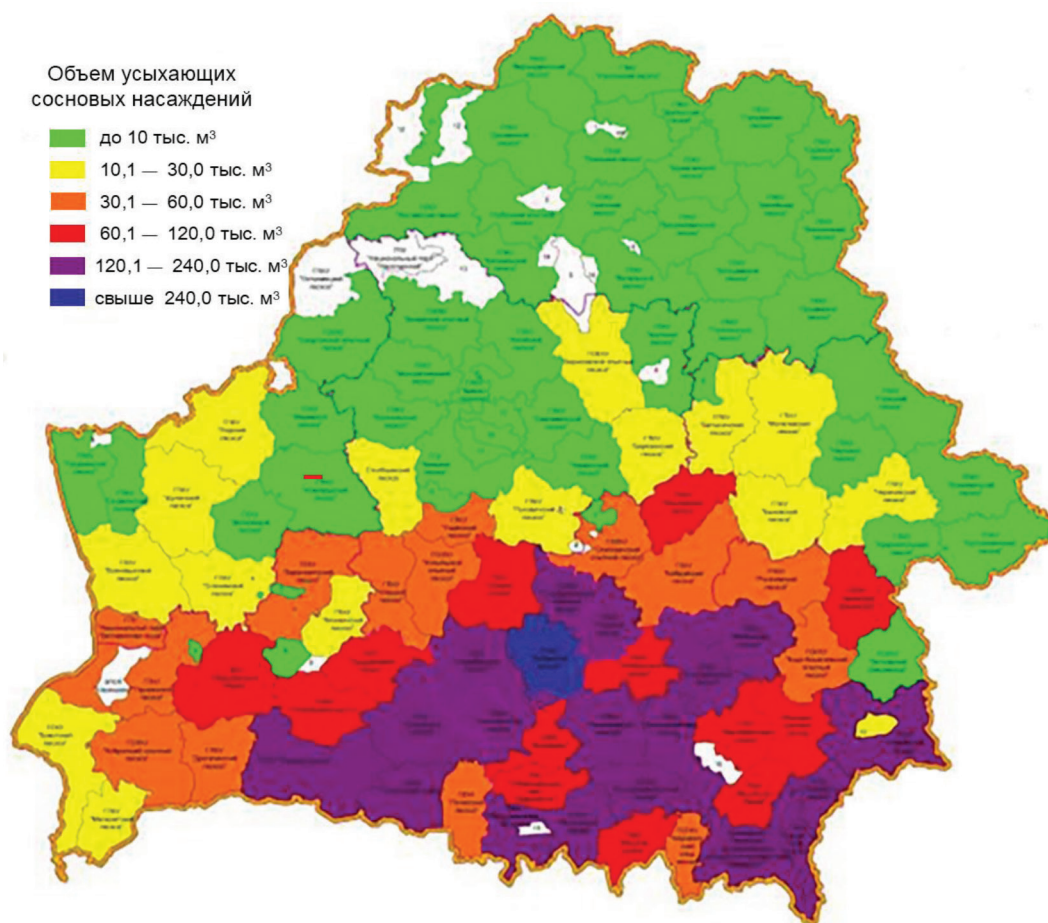


Рис. 2. Распространение массового усыхания сосновых насаждений (2017 г.)

Климат является важнейшим экологическим фактором, оказывающим существенное влияние на все компоненты окружающей среды [6–10]. Глобальное потепление, наблюдаемое в последние десятилетия, затрагивает различные процессы, протекающие в экосистемах. Согласно мнению ряда международных экспертов изменение климата представляет собой одну из самых серьезных угроз для биологического разнообразия планеты, и его роль в последующие десятилетия будет постоянно возрастать [2]. Климатические изменения вызывают целый ряд нарушений в функционировании лесных экосистем, оказывают влияние на вспышки численности вредителей и болезней.

В связи со значительным снижением устойчивости лесонасаждений к вредителям, болезням и неблагоприятным факторам окружающей среды важным являются выявление и анализ причин снижения устойчивости хвойных насаждений под воздействием эколого-климатических факторов.

Цель работы состоит в выявлении эколого-климатических факторов снижения устойчивости хвойных насаждений и их периодического массового усыхания. Район изучения включал бассейны рек Днепр и Припять за 2008–2022 гг. Исследования проведены с использованием данных Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь (НСМОС).

Основная часть. По данным гидрометеорологических наблюдений в Беларуси за последние 20 лет среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,1°C. Зафиксировано незначительное повышение количества осадков. Таким образом, мы наблюдаем климатический парадокс – малое изменение климатических характеристик в благоприятную для роста и развития растений сторону приводит к резкому сокращению их влагообеспеченности в течение вегетационного периода, снижению устойчивости и массовому усыханию хвойных насаждений.

Выявление закономерностей, объясняющих климатический парадокс, позволяет глубже понять причины резкого снижения устойчивости хвойных видов и их периодического массового усыхания. Причина этого явления обуславливается особенностями изменений температурного и гидрологического режимов в холодный период года. Следует отметить, что повышение температуры в последние десятилетия в основном приходится на холодное, вневегетационное время года. Ввиду этого и достаточно высокой

средней температуры зимнего периода существенно возросло количество и продолжительность оттепелей, что, в свою очередь, привело к радикальному изменению гидрологического режима рек южных регионов Беларуси. На основе данных мониторинга поверхностных вод НСМОС [8] в 2008–2022 гг. выявлено снижение весеннего расхода воды при повышении средней температуры вневегетационного периода года (ноябрь – март) (рис. 3, 4).

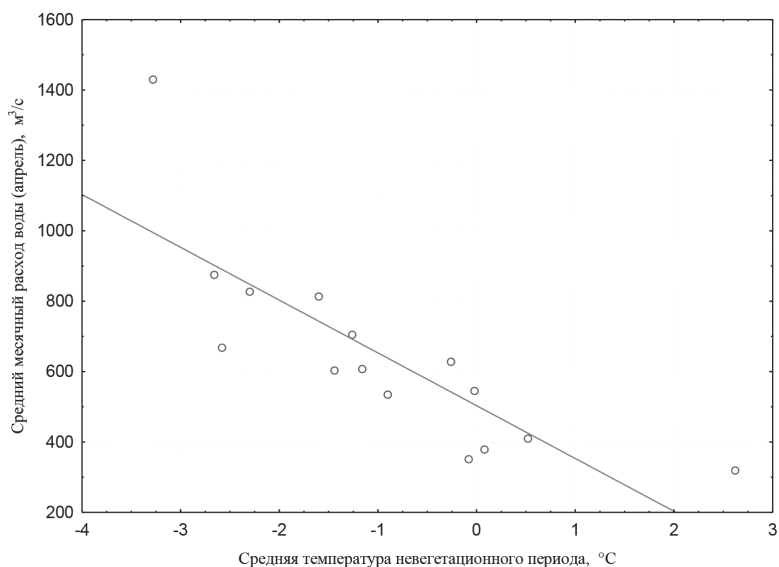


Рис. 3. Зависимость расхода воды р. Днепр в г. Речица в апреле 2008–2022 гг. от средней температуры вневегетационного периода

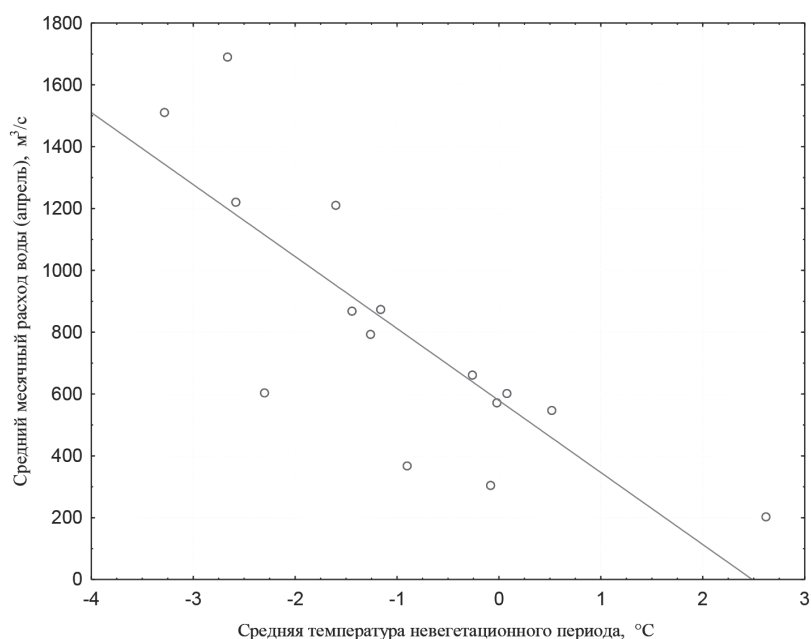


Рис. 4. Зависимость расхода воды р. Припять в г. Наровля в апреле от средней температуры вневегетационного периода

По результатам мониторинга поверхностных вод за 2008–2022 гг. средний расход воды р. Днепр в г. Речица в апреле (P_4) статистически значимо коррелирован со средней температурой ($T_{\text{нв}}$) вневегетационного периода (ноябрь – март). Коэффициент корреляции равен 0,81. Корреляционная взаимосвязь описывается следующим уравнением регрессии:

$$P_4 = 503,2 - 150,0 \cdot T_{\text{нв}}$$

Средний расход воды р. Припять в г. Наровля в апреле статистически значимо коррелирован со средней температурой вневегетационного периода с коэффициентом корреляции 0,80. Корреляционная взаимосвязь описывается следующим уравнением регрессии:

$$P_4 = 578,9 - 232,9 \cdot T_{\text{нв}}$$

Следствием данной закономерности является изменение внутригодового стока по сезонам года. Для бассейнов р. Припять, Западный Буг, Днепр и Неман характерно значительное снижение стока почти во все сезоны, за исключением зимнего, где имеет место резкое увеличение стока. Значительные изменения стока происходят в весенний период и связаны со снижением уровня весеннего половодья и более ранним его наступлением. Особенно это характерно для юга Беларуси – бассейнов р. Припять, Западный Буг, Днепр.

Таким образом, если до рассматриваемых климатических изменений происходило накопление влаги в зимний период и ее перенос в вегетационный период, то в настоящее время ввиду повышения температуры наблюдаются повышенный сток в зимний период и, как следствие, падение уровня грунтовых вод и низкая влагообеспеченность в период вегетации.

На рис. 5 показано снижение уровня подземных вод, выявленное в результате многолетних наблюдений в ходе мониторинга уровня подземных НСМОС Беларуси [9].

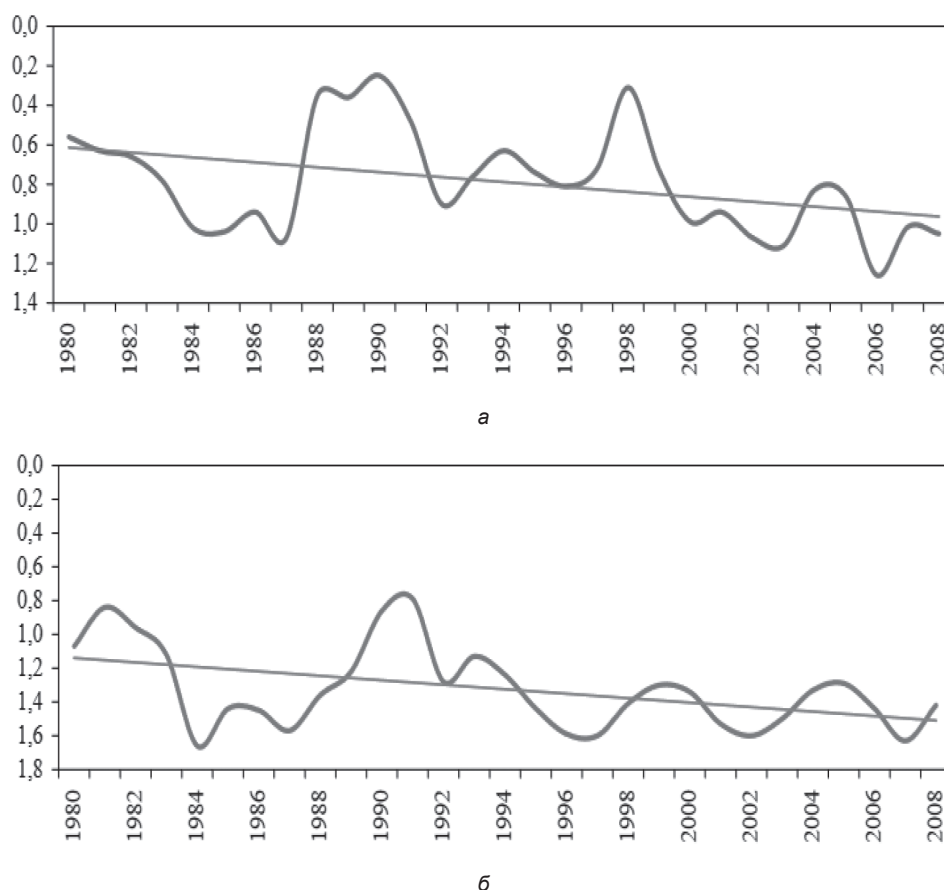


Рис. 5. Результаты наблюдений за изменениями уровня грунтовых вод:
а – в районе междуречья р. Днепр и Припять; б – в районе р. Припять

Следует отметить, что массовое усыхание хвойных насаждений в большей степени обуславливается минимальными значениями уровней поверхностных и грунтовых вод в вегетационный период года.

В бассейнах р. Днепр и Припять в 1989–2018 гг. выявлено увеличение количества осадков и в то же время отмечен рост числа засух по сравнению с предшествующим 30-летним периодом наблюдений [10]. Снижение весеннего влагонакопления, вызванное изменением температурного и гидрологического режимов зимнего времени года, способствует наблюдаемой за период потепления тенденции снижения запасов влаги в верхнем слое почвы в южных регионах Беларуси [11].

Следует также отметить повышение испарения влаги во вневегетационный период года вследствие повышения температуры и влажности. Этот процесс усугублен значительным трансграничным речным стоком на юге Беларуси и мелиоративным осушением заболоченных территорий, которые в сочетании с уменьшением и неравномерностью выпадения осадков приводят к возникновению засух, падению уровня грунтовых вод и снижению влагообеспеченности древесных и сельскохозяйственных растений.

Результаты многолетних наблюдений за изменениями режима уровня грунтовых вод на территории республики показали, что уровень подземных вод определяется главным образом климатическими факторами (инфильтрация атмосферных осадков и температура воздуха) [7].

Таким образом, изменения температурного и гидрологического режимов в холодный период, мелиоративное осушение заболоченных территорий являются основными причинами климатического опустынивания юга Беларуси и снижения уровня грунтовых вод. Как видно на рис. 2, распространение массового усыхания хвойных насаждений затрагивает преимущественно южные регионы.

Важнейшими факторами роста и развития древесных растений, формирования урожайности сельскохозяйственных культур является их тепло- и влагообеспеченность на протяжении всего периода вегетации. Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) является комплексной характеристикой уровня тепло- и влагообеспеченности территории. Данный агроклиматический показатель широко используется в агрономии для общей оценки климата и выделения зон различного уровня тепло- и влагообеспеченности с целью определения целесообразности выращивания тех или иных сельскохозяйственных культур и рассчитывается по формуле:

$$K = R \cdot 10 / \sum t,$$

где R – сумма осадков в миллиметрах за период с температурами выше $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sum t$ – сумма температур в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) за то же время.

Важно отметить, что данный агроклиматический показатель не учитывает запас почвенной влаги и уровень грунтовых вод, сформированные во вневегетационный период, что снижает его информативность для оценки влагообеспеченности древесных растений.

Древесные растения обладают развитой корневой системой, позволяющей им использовать накопленные в холодный период года глубоко залегающие запасы влаги в засушливые периоды. За вегетационный сезон они транспирируют около 300–400 мм воды [12]. Следует отметить, что хвойные виды транспирируют влаги в 1,5–2 раза меньше лиственных, что обуславливает их меньшую устойчивость к засухе. Транспирация влаги, поглощенная корневыми системами древесных растений, смягчает последствия засух для сельскохозяйственных культур. Таким образом, древесные растения способствуют снижению последствий глобального потепления.

При недостаточной влагообеспеченности у хвойных растений для сокращения транспирации влаги вследствие низкой доступности почвенной влаги и высокой температуры воздуха происходит замыкание клеток устьиц хвои, что приводит к снижению поглощения углекислого газа и, как следствие, к резкому снижению синтеза питательных веществ, а также запускается патофизиологический процесс углеводного голодания. Дефицит питательных веществ приводит к снижению синтеза вторичных метаболитов, в том числе терпеновых масел, которые являются основным компонентом живицы – основы иммунной системы хвойных растений. Снижение синтеза терпеновых масел уменьшает устойчивость насаждений к стволовым вредителям и фитопатогенам, что приводит к массовому усыханию хвойных насаждений.

Заключение. Обусловленное потеплением климата изменение температурного и гидрологического режимов во вневегетационный период года приводит к падению уровня грунтовых вод, сокращению водообеспеченности хвойных насаждений в вегетационный период. Сокращение водообеспеченности приводит к снижению их устойчивости, массовому усыханию и сукцессионному замещению лиственными видами. Снижение водообеспеченности древесных растений также вызывает сокращение объемов транспирации влаги, поглощенной корневыми системами, что влечет за собой уменьшение запасов влаги в верхнем слое почвы, снижение урожайности сельскохозяйственных культур.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости мониторинга и контроля уровня грунтовых вод при выращивании хвойных насаждений, целесообразности разработки эффективного индекса влагообеспеченности древесных растений, позволяющего учитывать наряду с осадками вегетационного периода запасы влаги, накопленные в зимний период.

Согласно прогнозам на ближайшие 60 лет на территории Республики Беларусь ожидается дальнейшее повышение среднегодовой температуры на 1,0–2,9 $^{\circ}\text{C}$. При этом прогнозируется незначительный рост среднегодового количества осадков, который будет приходиться на зимние месяцы, когда их роль как источника влаги для вегетации текущего года не столь велика. Это приведет к увеличению масштаба наблюдаемых в настоящее время явлений и сдвигу ареалов распространения хвойных видов.

Список использованных источников

1. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2024 г. – М.: РУП «Белгослес», 2024. – 87 с.
2. Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года / В. М. Байчоров [и др.]; под общ. ред. В. С. Хомича; Нац. акад. наук Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 332 с.
3. *Сарнацкий, В. В.* Особенности ведения хозяйства в условиях экстремальных нарушений лесных экосистем Беларуси / В. В. Сарнацкий // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2015. – № 1. – С. 21–25.
4. *Ковалевич, А. И.* Массовое усыхание ельников в Республике Беларусь: состояние, проблемы и пути решения / А. И. Ковалевич, В. В. Усеня // Проблемы и перспективы совершенствования лесоводственных мероприятий в защитных лесах: сб. ст. / Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лесного хоз-ва; ред.: З. С. Брунова, М. Ф. Нежлукто, М. М. Сергеева. – Пушкино: [б. и.], 2014. – С. 92–96.
5. *Ковалевич, А. И.* Усыхание сосновых лесов в Республике Беларусь: состояние и пути минимизации / А. И. Ковалевич, В. В. Усеня // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. – СПб.: СПбГЛТУ, 2023. – С. 263–265.
6. *Логинов, В. Ф.* Глобальные и региональные изменения климата. Причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск: ТетраСистемс, 2008, 476 с.
7. *Логинов, В. Ф.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. доп. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
8. Мониторинг поверхностных вод в Беларуси. Гидрохимические и гидробиологические статусы поверхностных вод за 2008–2022 годы [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.nsmos.by/environmental-monitoring/monitoring-poverkhnostnykh-vod>. – Дата доступа: 05.05.2024.
9. Национальная система мониторинга окружающей среды. Мониторинг подземных вод в Беларуси 2008 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.nsmos.by/sites/default/files/2023-08/podzemvodu08.pdf>. – Дата доступа: 05.05.2024.
10. Современные изменения режима увлажнения в теплый период года и условий формирования стока летне-осенней межени на реках Беларуси / И. С. Данилович [и др.] // Природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 22–33.
11. Пространственно-временные изменения почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 15–21.
12. *Гриневский, С. О.* Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод / С. О. Гриневский // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. – 2011. – № 3. – С. 41–52.

Поступила 07.06.2024

С. Э. Латышев

Витебский государственный университет имени П. М. Машерова, Витебск, Беларусь,
e-mail: slatyshev86@gmail.com

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN EX STEUD. В ОЗЕРАХ БУДОВЕСТЬ И ЛЕСКОВИЧИ (БЕЛОРУССКОЕ ПООЗЕРЬЕ)

Аннотация. Приводятся результаты изменения морфометрических, количественных и весовых показателей *Phragmites australis* в течение двух вегетационных периодов в двух разных водоемах. Для обоих озер была установлена почти одинаковая динамика изменения проанализированных параметров *Phragmites australis* в течение вегетационного периода на протяжении двух лет. Для каждого водоема в 2020 и 2021 гг. было выявлено наличие двух пиков значений фитомассы, массы и длины побегов (первая – третья декады июля и конец августа – начало сентября). Были установлены более высокие величины показателей фитомассы укосов, массы и числа побегов *Phragmites australis*, а также достоверное отличие проанализированных характеристик побегов, произрастающих на глубине 0,5 м, от значений, характерных для глубины 0,1 м. При анализе взаимосвязей показателей объекта исследования были получены достоверно высокие показатели корреляции фитомассы укоса с массой и числом побегов, а для прироста фитомассы – высокая корреляционная связь с показателями прироста массы и длины побега. Была установлена достоверная высокая корреляция прироста фитомассы со среднемесячными температурами.

Ключевые слова: *Phragmites australis*, Белорусское Поозерье, сезонная динамика, укосы, фитомасса

S. E. Latyshau

Vitebsk State University named after P. M. Masherov, Vitebsk, Belarus, e-mail: slatyshev86@gmail.com

SEASONAL DYNAMICS OF *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN EX STEUD. DEVELOPMENT IN BUDOVEST' AND LESKOVICHI LAKES (BELARUSIAN LAKELAND)

Annotation. This study presents the results of morphometric, quantitative, and weight parameters changes of *Phragmites australis* during two vegetation seasons in two different lakes are presented. The two lakes exhibited nearly identical dynamics in the changes of the analyzed parameters of *Phragmites australis* during the growing season over the two-year period. In both 2020 and 2021, the presence of two peaks in the values of phytomass, mass and length of shoots were identified in each reservoir, occurring in the 1–3 decade of July and the end of August–beginning of September. A notable discrepancy and elevated values for the phytomass, the mass and number of shoots of *Phragmites australis* growing at a depth of 0.5 m were observed in comparison to the values recorded at a depth of 0.1 m. Upon examining the interrelationships between the indicators of the object of study, reliable high correlation indicators were obtained for the phytomass with the mass and number of shoots. Additionally, for the gain of phytomass, a high correlation was evident with the indicators of weight gain and gain of shoot length. Furthermore, a reliable high correlation was established between phytomass gain and average monthly temperatures.

Keywords: *Phragmites australis*, Belarusian Lakeland, seasonal dynamics, phytomass, plant cuttings

С. Э. Латышаў

Віцебскі дзяржаўны ўніверсітэт імя П. М. Машэрава, Віцебск, Беларусь, e-mail: slatyshev86@gmail.com

СЕЗОННАЯ ДЫНАМІКА РАЗВІЦЦЯ *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN EX STEUD. У АЗЁРАХ БУДАВЕСЦЬ І ЛЕСКАВІЧЫ (БЕЛАРУСКАЕ ПААЗЕР'Е)

Анатацыя. Прыводзяцца вынікі змены марфаметрычных, колькасных і вагавых паказчыкаў *Phragmites australis* на працягу двух вегетацыйных перыядаў у двух розных вадаёмах. Для абодвух азёр была ўстаноўлена амаль аднолькавая дынаміка змены прааналізаваных параметраў *Phragmites australis* на працягу вегетацыйнага перыяду за два гады. Для кожнага вадаёма ў 2020 і 2021 гг. была выяўлена наяўнасць двух пікаў значэнняў фітамасы, масы і даўжыні парасткаў (першая – трэцяя дэкада ліпеня і канец жніўня – пачатак верасня). Былі ўстаноўлены больш высокія велічыні паказчыкаў фітамасы ўкосаў, масы і колькасці раслін *Phragmites australis*, а таксама дакладнае адрозненне параметраў парасткаў, якія растуць на глыбіні 0,5 м, ад паказчыкаў, характэрных для глыбіні 0,1 м. Пры аналізе ўзаемасувязяў паказчыкаў аб'екта даследавання былі атрыманы дакладныя высокія паказчыкі карэляцыі фітамасы ўкосы з масай і колькасцю раслін, а для прыросту фітамасы – высокая карэляцыйная сувязь з паказчыкамі прыросту масы і даўжыні раслін. Таксама была ўстаноўлена дакладная высокая карэляцыйная сувязь прыросту фітамасы з сярэднямесячнымі тэмпературамі.

Ключавыя словы: *Phragmites australis*, Беларускае Паазер'е, сезонная дынаміка, укосы, фітамаса

Введение. *Phragmites australis* (Cav.) Trin Ex Steud. является широко распространенным представителем водной растительности, формирует растительный покров водоемов, образует монодоминантные фитоценозы и входит в состав других растительных сообществ [1, 2]. Данный вид выступает в качестве доминирующего представителя более чем в 160 водоемах Беларуси [3]. На долю тростника обыкновен-

ного и его ассоциаций приходится значительная часть от общей продукции водных растений в водоемах [4, 5]. В качестве компонента естественных экосистем *Phragmites australis* играет важнейшую роль в водоемах: формирует условия существования для гидробионтов, участвует в образовании первичной продукции и кислорода, влияет на доступность и круговорот веществ [6, 7].

Человеком используется в различных отраслях: в качестве источника пищевого и лекарственного сырья, для получения кормовой продукции, производства топливных пеллет, укрепления берегов и фитомелиорации [7, 8]. В связи с широкой распространенностью и значительной ролью как в природе, так и для человека актуальным является вопрос изучения особенностей роста, развития и изменения различных параметров тростника обыкновенного в течение вегетационного периода. Подобные исследования проводились ранее и нами, и другими авторами [9–13], однако данную работу выделяет попытка установления статистических взаимосвязей различных показателей тростника обыкновенного между собой и с климатическими факторами в течение вегетационного периода на протяжении двух лет в двух разных озерах.

Материалы и методы. Для изучения особенностей сезонной динамики *Phragmites australis* были проведены наблюдения в 2020–2021 гг. по общепринятым методикам [14]. Исследования осуществлялись на территории одних и тех же локалитетов в озерах Лесковичи и Будовесь. Данные водоемы расположены в Шумилинском р-не Витебской обл. [15]. Водоемы имеют котловины ложбинного типа. Площадь озера Лесковичи 0,72 км², протяженность береговой линии 8,2 км, максимальная глубина 30,7 м. Площадь озера Будовесь 3,14 км², протяженность береговой линии 13,4 км, максимальная глубина 10,3 м [15]. За период проведения наблюдений прозрачность воды по диску Секки в первом объекте варьировала от 1,6 до 3,3 м, а во втором составляла 2,6 м. В соответствии с показателями прозрачности по индексу Карлсона озеро Лесковичи можно отнести к эвтрофно-мезотрофному типу, а озеро Будовесь – к мезотрофному [16]. Фиксация показателей по длине побегов и массе укосов проводилась с июня по середину октября. Отбор проб осуществлялся в среднем не реже одного раза в две недели. Каждый раз отбиралось по три укоса на площади 1 м² с глубины 0,1, 0,3 и 0,5 м, подсчитывалось число экземпляров. Всего за два года было отобрано 120 укосов. Для каждого укоса измерялась длина 4 экземпляров (2 самых коротких и 2 самых длинных) для оценки среднего размера, диапазона значений и наличия образующихся новых побегов. При проведении статистической обработки результатов, полученные величины подвергались проверке на нормальность распределения ($p < 0,05$ по критерию Шапиро–Уилка). В зависимости от типа распределения данных и гомогенности дисперсии по критерию Левене ($p > 0,05$) нами применялись методы как параметрической статистики (критерий Стьюдента для сравнения двух независимых выборок, one-way ANOVA при сравнении более двух выборок), так и непараметрические методы (критерий Манна–Уитни для сравнения двух выборок, коэффициент Спирмена для установления корреляционных взаимосвязей, тест Крускала–Уолиса при проведении однофакторного дисперсионного анализа) [17–20].

Результаты и их обсуждение. За время проведения наблюдений колебания фитомассы укосов находились в диапазоне от 155 до 985 г/м² для озера Будовесь и от 120 до 885 г/м² для озера Лесковичи. Масса одного побега варьировала от 6,8 до 31,7 г/экз. и от 12,7 до 45,9 г/экз. для озер Будовесь и Лесковичи соответственно. Число побегов тростника обыкновенного в озере Будовесь находилось в пределах 8–42 на 1 м², а длина растений – в диапазоне 56–260 см. Для озера Лесковичи эти показатели соответственно составляли 9–27 экземпляров на 1 м² и 70–292 см. Минимальные значения фитомассы укосов и массы экземпляров соответствовали глубине 0,1 м, а максимальные – глубине 0,5 м. Минимальные и максимальные показатели длины побегов и их количества на квадратный метр с глубиной не связаны.

Для каждого водоема было произведено попарное сравнение всех характеристик за 2020 и 2021 гг. В зависимости от типа распределения по критерию Шапиро–Уилка ($p > 0,05$) использовались методы параметрической (критерий Стьюдента) или непараметрической статистики (критерий Манна–Уитни). Было установлено, что для озера Будовесь выборки за 2020 г. статистически достоверно неотличимы от данных за 2021 г. В свою очередь, для озера Лесковичи установлены достоверные различия между показателями массы укосов, массы экземпляра и длины побега за два периода наблюдений и выявлены более высокие значения в 2020 г. (табл. 1). Некоторыми авторами [12], высказывалось предположение о влиянии холодной зимы на снижение показателей продукции, более позднее начало вегетации и достижение максимума биомассы. Если сравнивать данные по температуре для Витебска как ближайшего к объектам исследования гидрометеорологического пункта мониторинга за периоды с января по апрель 2020 и 2021 гг., то это предположение кажется весьма справедливым для объяснения более низких параметров *Phragmites australis* в озере Лесковичи в 2021 г. Так, для 2020 г. среднемесячные значения температур в Витебске за указанный период составляют 1,1, 1, 3,6 и 6 °С, а для 2021 г. –4,5, –7,8, 0,4, 6,6 °С [21]. Озеро Будовесь находится на расстоянии менее 5 км от озера Лесковичи, и влияние

Таблица 1. Среднегодовые показатели тростника по глубине произрастания

Показатели	Озеро	Год	Глубина, м		
			0.1	0.3	0.5
Масса укоса, г/м ²	Будовесь	2020	293	387	595,5
		2021	285,6	467,2	586,7
	Лесковичи	2020	365,5	439,5	564,5
		2021	218,9	333,3	471,1
Масса экземпляра, г	Будовесь	2020	13,2	16	21
		2021	15,6	18,4	21,2
	Лесковичи	2020	23,9	28,9	30,1
		2021	21	25,1	29,9
Число экземпляров, шт.	Будовесь	2020	22,5	24,3	28,7
		2021	18,9	25,6	28
	Лесковичи	2020	14,8	15,4	18,5
		2021	10,3	13,3	16,2
Длина побега, см	Будовесь	2020	135,2	145	162
		2021	146,7	158,8	170,3
	Лесковичи	2020	185,6	188,5	199,1
		2021	172,4	174,9	186,4

более низких зимних температур в 2021 г. не вызвало достоверных отличий показателей *Phragmites australis* в этом водоеме по сравнению с 2020 г. Вероятно, кроме динамики среднемесячных температур на интенсивность роста, величину и сроки наступления максимальных значений биомассы оказывают влияние и другие факторы, выяснить которые еще предстоит.

Сравнивая показатели табл. 1 можно заметить, что для глубины 0,5 м в двух водоемах за разные годы характерны наиболее высокие значения всех характеристик. Для того чтобы проверить данную гипотезу, нами был проведен однофакторный дисперсионный анализ для установления зависимости различных показателей тростника обыкновенного от глубины произрастания. Результаты показали, что при анализе массы укоса, массы экземпляра, числа экземпляров, длины побега в каждом из озер при использовании выборки данных за 2020–2021 гг. достоверно между собой будут отличаться показатели всех значений на глубине 0,5 и 0,1 м, кроме длины побегов в озере Лесковичи. Было также установлено достоверное отличие массы укоса и экземпляра для всех глубин в озере Будовесь за 2020–2021 гг. и достоверное отличие значений на глубине 0,5 м от показателей для глубины 0,3 и 0,1 м для длины побегов в озере Будовесь и массы укоса в озере Лесковичи за 2020–2021 гг. Таким образом, в обследованных озерах было установлено, что с увеличением глубины увеличивается масса и укосов, и единичных экземпляров.

Для разных объектов и регионов приводятся различные сроки достижения максимальной биомассы тростником обыкновенным. В более ранних проведенных нами исследованиях максимальные показатели фитомассы наблюдались в конце августа [9]. В озере Нарочь в зависимости от климатических условий эти сроки могут приходиться на вторую половину июля или середину августа [12]. Для торфяных месторождений Тверской обл. [13] и переувлажненных торфяных почв Германии, Дании, Нидерландов [22] максимальные значения биомассы *Phragmites australis* отмечены в августе. По данным В. Г. Папченко, для тростника обыкновенного «максимальная биомасса отмечается в начале июля и совпадает со временем появления метелок» [23, с. 137],

Как видно из рис. 1, для каждого из графиков характерно наличие двух пиков максимума фитомассы, которые приходятся в основном на первую половину июля (исключение Будовесь, 2020 г.) и вторую половину августа – начало сентября. Следует отметить, что наличие двух или нескольких подъемов показателей накопления биомассы в течение вегетационного периода отмечалось для представителей гидрофитов Верхнего Поволжья [2, 25]. До первого пика происходило увеличение значений биомассы укосов тростника, затем всегда отмечался спад разной степени выраженности, после чего наблюдались подъем и достижение максимальных показателей, соответствующих второму пику. По нашим наблюдениям, наиболее высокие показатели фитомассы приходились на период массового цветения тростника обыкновенного: процент цветущих побегов в укосах от общего числа варьировал от 40 % (озеро Лесковичи, 2021 г.) до 80 % (озеро Лесковичи, 2020 г.), появление метелок отмечено в конце июля – начале августа. За период 2020–2021 гг. для озер Будовесь и Лесковичи отмечено совпадение по времени трех

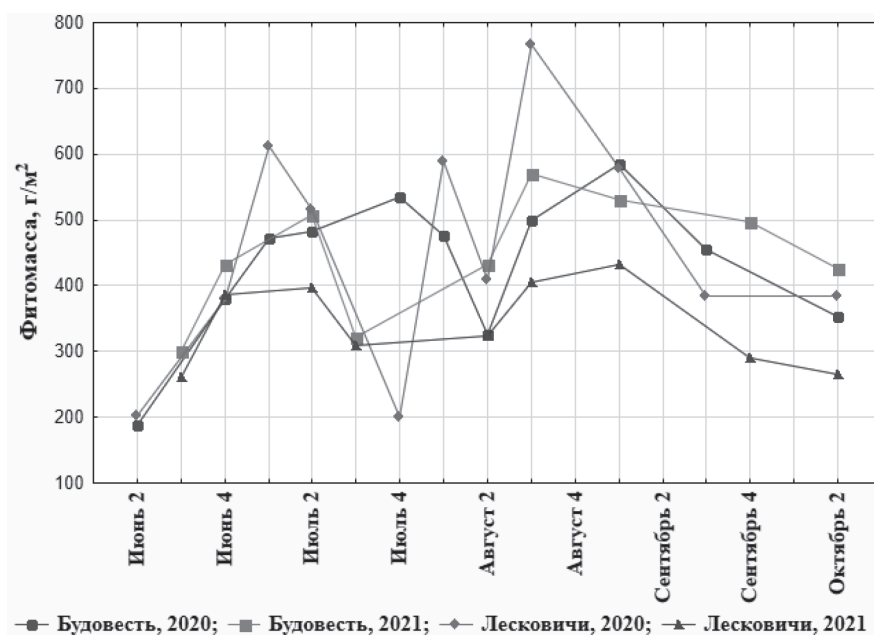


Рис. 1. Изменение величины укосов *Phragmites australis* в течение вегетационного периода (данные приводятся за вторую и четвертую недели каждого месяца)

из четырех пар пиков фитомассы, однако лишь одна пара в двух озерах синхронно наблюдается в течение одного года. Если анализировать данные по динамике фитомассы для каждого водоема в течение вегетационного периода в разные годы, то можно заметить, что для озера Будовесть наблюдались очень близкие по значениям показатели наибольших величин: 535 и 508,3 г/м² в июле – августе – сентябре в 2020 и 2021 гг. соответственно. Для озера Лесковичи показатели пиков фитомассы сильно различаются: 613 и 396,7 г/м² в июле, 766,7 и 433,3 г/м² в августе – сентябре.

При анализе изменения веса тростника в течение вегетационного периода в пересчете на один экземпляр (рис. 2) также характерно наличие двух максимумов для каждого из водоемов, которые приходились на вторую – третью декады июля и конец августа – начало сентября. От намеченного тренда отклонялись показатели озера Лесковичи в 2021 г., где фактически было выявлено три пика, после каждого из которых отмечался спад значений. Следует отметить, что первый (26 июня) и второй (21 июля) пики одинаковы по величине – 26,9 г/экз., в связи с чем при анализе общей картины мы учитывали данные за 21 июля 2021 г. Совпадение пиков фитомассы и веса в пересчете на 1 экземпляр было установлено в озере Будовесть 1 сентября 2020 г. и 22 августа 2021 г. По сравнению с сезонной динамикой укосов, где синхронное совпадение максимальных значений для озер Будовесть и Лесковичи было отмечено только во второй декаде июля 2021 г., для показателей в пересчете на один экземпляр характерно совпадение всех четырех максимумов на двух объектах в одни и те же периоды. Кроме того, максимальные показатели в одном озере в разные годы характеризовались меньшими отличиями. Для озера Будовесть значения первого пика достигали 19 и 19,2 г/экз., а второго – 21,3 и 22,8 г/экз. в 2020 и 2021 гг. соответственно. Для озера Лесковичи эти показатели составили 31,7 и 26,9 г/экз. во второй–третьей декадах июля, 39,1 и 32,2 г/экз. в конце августа – начале сентября в 2020 и 2021 гг. Еще одним отличием, кроме показателей фитомассы, является динамика величин после второго пика. На рис. 1 видно, что после достижения максимальной фитомассы происходило уменьшение значений, на рис. 2 показано, что в трех случаях из четырех происходит рост значений во второй декаде октября (по сравнению с предыдущим значением), что, скорее всего, связано с характером изменения средней длины побегов.

Изменения средней длины экземпляров в течение вегетационного периода отражены на рис. 3. Как и в предыдущих случаях, на каждом графике имеются две точки максимума: первая – третья декады июля и конец августа – начало сентября, и в одном из случаев во вторую декаду октября (озеро Лесковичи, 2020 г.). Для показателей фитомассы, массы побегов и длины экземпляров, выделение двух пиков обусловлено наличием временного интервала, приходившегося на третью неделю июля – вторую неделю августа, в течение которого наблюдалось снижение вышеотмеченных характеристик. Как отмечали другие исследователи [12] и как видно из рис. 3, в это время происходило появление новой генерации молодых низких побегов, что и привело к снижению всех величин. Для озер Лесковичи и Будовесть за период исследования характерно синхронное совпадение шести из восьми максимумов значений длины с максимальной массой в пересчете на 1 экземпляр. Совпадение пиков фитомассы и длины за

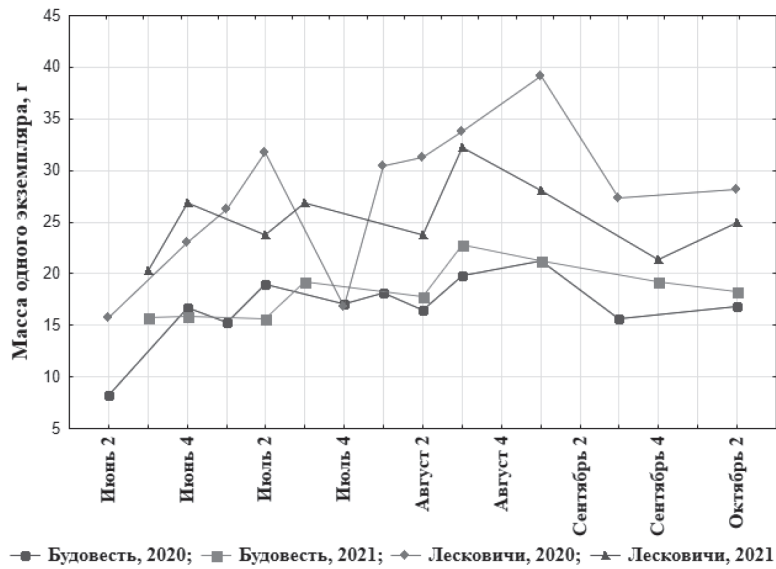


Рис. 2. Изменение массы *Phragmites australis* в течение вегетационного периода в пересчете на 1 экземпляр (данные приводятся за вторую и четвертую недели каждого месяца)

два года на обследованных объектах наблюдалось в трех из восьми случаев. Для показателей длины побегов (см. рис. 3), как и для показателей массы отдельных экземпляров (см. рис. 2), наблюдалось повышение средних значений к октябрю по сравнению с предыдущими показателями. Вероятнее всего, это объясняется прекращением формирования новых побегов, так как отсутствовали экземпляры с длиной менее 100 см.

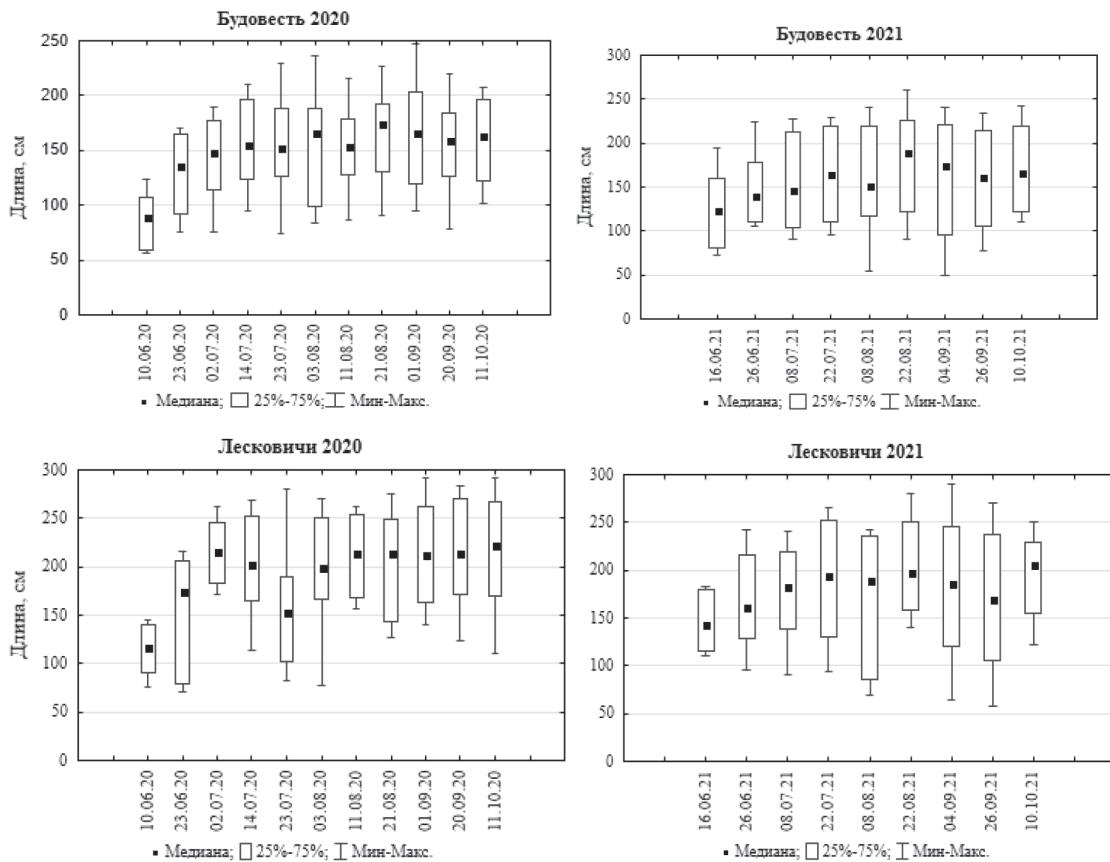


Рис. 3. Изменение размера побегов *Phragmites australis* в течение вегетационного периода

В литературных источниках приводятся положения о зависимости биомассы тростника от времени наступления определенных фенофаз [23], влиянии температур [12, 24] и гидрологического режима грунтов [13, 26]. В данном исследовании была предпринята попытка установить взаимосвязи показателей *Phragmites australis* между собой и с климатическими параметрами на основании среднемесячных величин. В связи с тем что озера Будовесть и Лесковичи находятся друг от друга на расстоянии менее 5 км, было принято решение вносить в таблицу среднеарифметические данные двух вышеуказанных объектов. Показатели прироста рассчитывались по разнице между среднеарифметическими значениями текущего месяца и предыдущего. Параметры по приросту для июня определялись по разнице между последними и первыми значениями. Показатели температуры и количества осадков приведены по Витебску в качестве ближайшей точки гидрометеорологического мониторинга [21].

Как видно из табл. 2, максимальные среднеарифметические величины показателей фитомассы и массы побега приходятся на август – сентябрь, а наибольшие показатели длины – на октябрь. По нашим данным, наиболее высокие показатели прироста массы укосов, массы и длины побега отмечены в июне – июле [9]. Сходные выводы отмечены для торфяных выработок Тверской обл. [13]. В исследовании, проводимом для озера Нарочь [12], максимальные значения прироста отмечались в мае – июне с замедлением в июле, что, скорее всего, будет справедливым для озер Лесковичи и Будовесть. Вероятно, данные тенденции позволяют предположить, что наиболее активный рост показателей фитомассы *Phragmites australis* наблюдается до третьей недели июля и продолжается до конца лета.

Таблица 2. Среднемесячные показатели тростника и климатических факторов для обследованных озер

Месяц, год	Масса укоса, г/м ²	Масса одного побега, г	Длина побега, см	Число побегов на 1 м ²	Прирост массы укоса, г/м ²	Прирост массы побега, г	Прирост длины побега, см	Температура, °С	Количество осадков, мм
май 2020	–	–	–	–	–	–	–	11,1	43,5
июнь 2020	287,2	15,9	118,9	18,7	185,7	7,9	38,1	19,8	87,7
июль 2020	470,0	21,0	172,8	25,4	182,8	5,1	53,9	17,8	140,0
август 2020	510,8	25,0	180,8	20,8	40,9	4,0	8,0	17,7	42,2
сентябрь 2020	516,7	25,8	186,7	21,0	5,8	0,8	5,9	14,4	77,5
октябрь 2020	389,0	22,5	189,2	17,5	–127,7	–3,3	2,5	10,1	64,8
май 2021	–	–	–	–	–	–	–	12,7	89,7
июнь 2021	345,5	19,7	147,7	18,4	127,9	3,8	29,1	20,3	28,7
июль 2021	383,8	21,4	171,5	19,2	38,3	1,7	23,8	23,1	21,3
август 2021	432,9	24,2	178,4	18,7	49,2	2,8	6,9	17,9	95,8
сентябрь 2021	437,5	22,5	168,4	19,6	4,6	–1,7	–10,0	10,1	96,7
октябрь 2021	345,0	21,6	182,6	16,7	–92,5	–0,9	14,2	7,0	36,5

В связи с тем что часть данных не соответствует закону нормального распределения для выявления корреляционных взаимосвязей, нами были использованы методы непараметрической статистики (коэффициент Спирмена, $p < 0,05$). Как видно из табл. 3, статистически достоверно масса укоса ожидаемо имеет высокую положительную взаимосвязь с массой побега и числом экземпляров. В свою очередь, масса побега имеет высокую положительную связь с длиной побега и отрицательную с приростом длины побега, так как максимальные значения данных величин приходятся на разные месяцы – октябрь и июль – июль соответственно. Достоверно заметные отрицательные значения корреляции наблюдаются для длины побега и показателей прироста фитомассы и средней температуры. Показатели прироста массы побега имеют положительную высокую связь с приростом длины побега, а прирост массы укоса характеризуется положительной высокой корреляцией с приростом массы и длины побега. Установлена достоверно высокая положительная связь среднемесячных температур с приростом массы укоса и заметная – с приростом массы побега, в то время как количество осадков не имеет достоверных и хотя бы значимых взаимосвязей с массово-количественными характеристиками тростника обыкновенного. Для

Таблица 3. Значения корреляции показателей *Phragmites australis* и климатических характеристик

Показатели	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	1,00								
X2	0,75	1,00							
X3	0,44	0,72	1,00						
X4	0,79	0,29	-0,06	1,00					
X5	-0,13	-0,53	-0,68	0,33	1,00				
X6	-0,08	-0,45	-0,55	0,36	0,95	1,00			
X7	-0,41	-0,77	-0,52	0,07	0,77	0,81	1,00		
X8	-0,25	-0,49	-0,64	0,14	0,74	0,64	0,61	1,00	
X9	0,39	0,10	-0,08	0,47	0,25	0,15	-0,12	-0,25	1,00

Примечание. Курсивом отмечены достоверные значения ($p < 0,05$), полужирным курсивом – достоверные, более 0,7 (или менее -0,7); X1 – фитомасса укоса; X2 – масса одного побега; X3 – длина побега; X4 – число побегов на 1м²; X5 – прирост массы укоса; X6 – прирост массы побега; X7 – прирост длины побега; X8 – температура; X9 – количество осадков.

каждого из водоемов по отдельности также выявлена достоверная взаимосвязь прироста фитомассы со среднемесячными температурами – 0,64 для озера Будовесть и 0,71 для озера Лесковичи (рис. 4). Кроме того, нами была проверена гипотеза о влиянии предшествующих климатических показателей на массу, число побегов и прирост укосов и экземпляров *Phragmites australis*. Для этого мы сравнили среднемесячные температуры и число осадков предшествующих месяцев (период май – сентябрь) с величинами массы укосов, числа и массы побегов и приростом за текущие месяцы (период июнь – октябрь). Достоверные значения отсутствовали, а для массы укоса и числа побегов были характерны недостоверные положительные заметные величины коэффициента корреляции с температурами (0,53 и 0,55 соответственно). Очевидно, что полученные результаты следует воспринимать с осторожностью в связи с небольшим охватом анализируемой выборки, по мере возможности увеличивать объем данных, проводить дальнейшие наблюдения и сравнивать их с показателями для других регионов и объектов.

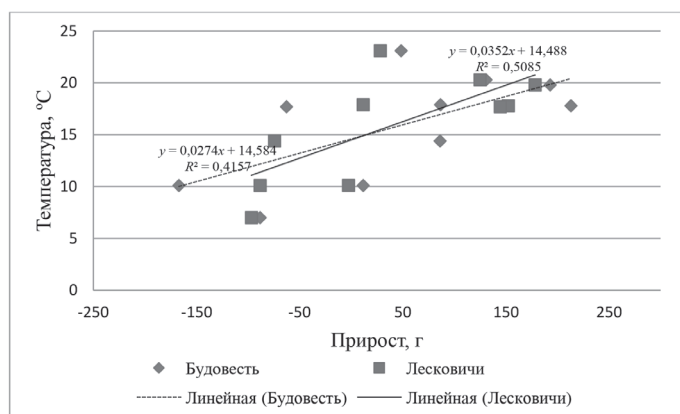


Рис. 4. Взаимосвязь прироста фитомассы со среднемесячными температурами

Заключение. Таким образом, в результате проведенного исследования было показано, что в течение вегетационного периода в озерах Будовесть и Лесковичи для таких показателей тростника обыкновенного, как фитомасса, масса в пересчете на один экземпляр и длина побега, характерно наличие двух пиков с максимумом значений, приходящимся на конец августа – начало сентября. За два вегетационных периода 2020–2021 гг. для значений удельного веса экземпляра характерно совпадение всех четырех максимумов в двух водоемах и синхронное совпадение трех из четырех пар пиковых значений массы экземпляра с длиной побега. Выявлены достоверно высокие положительные корреляционные значения массы укоса с массой побега и числом побегов, а для прироста массы укоса – взаимосвязь с приростом массы побега и приростом длины побега. По результатам исследований была отмечена достоверно высокая корреляция среднемесячных температур со среднемесячными показателями прироста массы укоса для двух водоемов в общем и для каждого озера по отдельности.

Список использованных источников

1. Латышев, С. Э. Характеристика видового состава высшей водной растительности озера Чернясто / С. Э. Латышев, Л. М. Мерзвинский, Ю. И. Высоцкий // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 74-й Регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов, Витебск, 18 февр. 2022 г. – Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2022. – С. 72–74.
2. Мартыненко, В. П. Макрофитная растительность оз. Лосвидо и ее изменение за 35 лет / В. П. Мартыненко, С. Э. Латышев // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та імя П. М. Машэрава. – 2006. – № 2 (40). – С. 128–133.
3. Гигевич, Г. С. Ресурсы высших водных растений озер Беларуси / Г. С. Гигевич, Б. П. Власов, Г. В. Вынаев // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 1999. – № 3 (13). – С. 66–71.
4. Водная растительность озера Черствятское / Б. П. Власов [и др.] // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 2020. – № 4 (109). – С. 39–45.
5. Высшая растительность озера Белое (Сурмино) и тенденции ее изменения / С. Э. Латышев [и др.] // Весн. ВДУ. – 2013. – № 5 (7). – С. 69–75.
6. Кудряшов, В. П. Особенности накопления америция и плутония чернобыльского выброса макрофитами водных систем Гомельской области / В. П. Кудряшов, В. И. Гапоненко, А. В. Зубарева // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2008. – № 4. – С. 91–94.
7. Гигевич, Г. С. Высшие водные растения Беларуси. Эколого-биологическая характеристика, использование и охрана / Г. С. Гигевич, Б. П. Власов, Г. В. Вынаев. – Минск: БГУ, 2001. – 231 с.
8. Флора Беларуси. Сосудистые растения: в 6 т. / под общ. ред. В. И. Парфенова; Нац. акад. наук Беларусі, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск: Беларус. навука. – Т. 2. *Liliopsida (Acoraceae, Alismataceae, Araceae, Butomaceae, Commelinaceae, Hydrocharitaceae, Juncaginaceae, Lemnaceae, Najadaceae, Poaceae, Potamogetonaceae, Scheuchzeriaceae, Sparganiaceae, Typhaceae, Zannichelliaceae)* / Д. И. Третьяков [и др.]. – 2013. – 447 с.
9. Латышев, С. Э. Изменение фитомассы тростника обыкновенного в течение вегетационного сезона в разнотипных озерах Белорусского Поозерья // Наука – образованию, производству, экономике: материалы XVIII (65) Регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов, Витебск, 13–14 марта, 2013 г.: в 2 т. – Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2013. – Т. 1. – С. 97–100.
10. Оценка запасов тростника обыкновенного на некоторых водоемах западной части Беларуси и потенциала его использования в экологическом строительстве / Л. С. Чумаков [и др.] // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию со дня рождения акад. Н. В. Смольского (7–9 окт. 2015 г., Минск, Беларусь): в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларусі [и др.]; редкол.: В. В. Титок [и др.]. – Минск: Конфидо, 2015. – Ч. 1 – С. 225–228.
11. Жукова, А. А. Тростник в литорали оз. Нарочь / А. А. Жукова, А. Ю. Панько, Д. В. Крюк // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: материалы V Междунар. науч. конф., 12–17 сент. 2016 г., Минск – Нарочь / сост. и общ. ред. Т. М. Михеева. – Минск: БГУ, 2016. – С. 138–140.
12. Сезонная динамика роста тростника озера Нарочь: результаты трех лет мониторинга / А. А. Жукова [и др.] // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: материалы III Междунар. науч. семинара (Минск – Гродно, Беларусь, 26–28 сент. 2018 г.). – Минск: Колорград, 2018. – С. 53–56.
13. Кукушкина Е. Е. Перспективы получения биомассы тростника (*Phragmites australis*) при естественном зарастании выработанных торфяных месторождений в условиях Тверской области / Е. Е. Кукушкина, В. В. Панов // Тр. Инсторфа. – 2015. – № 11(64). – С. 19–31.
14. Катанская, В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения / В. М. Катанская / отв. ред. И. М. Распопов. – Л.: Наука, 1981. – 187 с.
15. Блакiтная кнiга Беларусі: энцыклапедыя / Н. А. Дзiсько [i інш.]. – Мiнск.: БелЭн, 1994. – 415 с.
16. Carlson, R. E. A trophic state index for lakes / R. E. Carlson // Limnol. Oceanog. – 1977. – Vol. 11. – P. 361–369.
17. Сушко, Г. Г. Биометрия: метод. указания для проведения лаб. работ: в 2 ч. / Г. Г. Сушко, И. А. Литвенкова. – Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2019. – Ч. 2. – 47 с.
18. Халафян, А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учебник / А. А. Халафян. – 3-е изд. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
19. Ковалев, А. А. Основы статистики. Конспект лекций: учеб.-метод. пособие для студентов 3–6-х курсов всех фак. мед. вузов / А. А. Ковалев, В. А. Игнатенко. – Гомель: ГомГМУ, 2018. – 176 с.
20. Сушко, Г. Г. Дисперсионный анализ с использованием программного обеспечения PAST 4.04 / Г. Г. Сушко // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 2021. – № 1 (110). – С. 64–73.
21. Климатический кадастр Республики Беларусь: метеорол. ежемесячник. – Минск: Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактив. загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2020–2021 гг.
22. Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral soils / J. J. M. Geurts [et al.] // Sci. Total Environ. – 2020. – Vol. 747. – P. 141102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141102>
23. Папченко, В. Г. Продукция макрофитов вод и методы их изучения / В. Г. Папченко // Гидробиотаника: методология, методы: материалы Шк. по гидробиотанике (п. Борок, 8–12 апр. 2003 г.). – Рыбинск: ОАО «Рыбинский Дом печати», 2003. – С. 137–145.
24. Шаратов, А. В. Запасы надземной фитомассы речных макрофитов Верхнего Поволжья и ее сезонная динамика / А. В. Шаратов, Е. В. Чемерис, А. А. Бобров // Растит. ресурсы. – 2013. – Т. 49, вып. 1. – С. 48–56.
25. Чернова, А. М. Сезонная динамика продуктивности кубышки желтой *Nuphar lutea* (L.) Smith. (Nymphaeaceae) в малой реке Ильдь (Ярославская область) / А. М. Чернова // Биология внутр. вод. – 2015. – № 2. – С. 60–68.
26. Кукушкина, Е. Е. Влияние условий произрастания растений тростника (*Phragmites australis*) на формирование биомассы / Е. Е. Кукушкина // Науч. альм. – 2016. – № 1–2(15). <https://doi.org/10.17117/na.2016.01.02.472>

Поступила 21.03.2024

А. А. Сакович¹, М. С. Малько²¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь,
e-mail: anastasia_pryaz@inbox.ru²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
Минск, Беларусь, e-mail: zentsova2009@gmail.com**ОСОБЕННОСТИ ТАКСОНОМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ
БРИОФЛОРЫ ПОЛЕССКОГО РЕГИОНА**

Аннотация. Статья является продолжением цикла публикаций по мохообразным Полесского региона (Беларусь, Украина, Россия). Цель работы – выявление таксономических особенностей бриофлоры Полесья и ее места среди других бриофлор. В настоящей работе представлены характеристики таксономического состава Полесья в сравнении с другими регионами Беларуси, отдельными районами юго-запада Европейской России (Московская, Калужская, Тульская обл.) и некоторыми европейскими странами (Венгрия, Литва, Латвия, Украина (Восточные Карпаты), Словакия). Выявлено, что наибольшее сходство бриофлора Полесья проявляет с соседними регионами: с бриофлорами Латвии, Литвы и юго-запада Европейской России, сохраняя при этом связи с флорами Центральной Европы. Выявлен различный вклад каждого таксона в исследованную территорию. Показано, что своеобразие территорий определяют представители семейств Dicranaceae, Brachytheciaceae, Orthotrichaceae, Grimmiaceae, тогда как сходные таксономические категории, имеющие широкое распространение, не могут определять дифференциацию таксономической структуры.

Ключевые слова: мохообразные, бриофлора, таксономический анализ, Полесье, ареал

А. А. Sakovich¹, M. S. Mal'ko²¹Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus, e-mail: e-mail: anastasia_pryaz@inbox.ru²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Belarus,
e-mail: zentsova2009@gmail.com**FEATURES OF THE TAXONOMIC COMPOSITION AND STRUCTURE
OF BRYOFLORES OF THE POLESIE REGION**

Abstract. This article is a continuation of the series of publications on bryophytes of the Polesie region (Belarus, Ukraine, Russia). The purpose of this study is to identify the taxonomic features of the bryoflora of Polesie and its place among other bryofloras. This paper presents a comparative analysis of the characteristics of the taxonomic composition of Polesie with other regions of Belarus, select areas of the southwest of European Russia (Moscow, Kaluga, Tula regions), and several European countries (Hungary, Lithuania, Latvia, Ukraine (Eastern Carpathians), Slovakia). It was determined that the bryoflora of Polesie exhibits the greatest similarity with neighboring regions, specifically with the bryofloras of Latvia, Lithuania and the southwest of European Russia, while maintaining connections with the floras of Central Europe. The different contributions of each taxon to the studied area were identified. It is demonstrated that the distinctive characteristics of the territories are determined by representatives of the families Dicranaceae, Brachytheciaceae, Orthotrichaceae, and Grimmiaceae. Conversely, similar taxonomic categories that are widespread do not determine the differentiation of the taxonomic structure.

Keywords: bryophytes, bryoflora, taxonomic analysis, Polesie, habitat

А. А. Сакович¹, М. С. Малько²¹Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы, Гродна, Беларусь, e-mail: anastasia_pryaz@inbox.ru²Навукова-практычны цэнтр Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па біярэсурсах, Мінск, Беларусь,
e-mail: zentsova2009@gmail.com**АСАБЛІВАСЦІ ТАКСАНАМІЧНАГА СКЛАДУ І СТРУКТУРЫ БРЫЯФЛОРЫ
ПАЛЕСКАГА РЕГІОНА**

Анотацыя. Артыкул з'яўляецца працягам цыклу публікацый па мохападобных Палескага рэгіёна (Беларусь, Украіна, Расія). Мэта работы – выяўленне таксанамічных асаблівасцяў брыяфлоры Палесся і яе месца сярод іншых брыяфлор. У дадзенай працы прадстаўлены характарыстыкі таксанамічнага складу Палесся ў параўнанні з іншымі рэгіёнамі Беларусі, асобнымі раёнамі паўднёвага захаду Еўрапейскай Расіі (Маскоўская, Калужская, Тульская вобл.) і некаторымі еўрапейскімі краінамі (Венгрыя, Літва, Латвія, Украіна (Усходнія Карпаты), Славакія). Выяўлена, што найбольшае падабенства брыяфлора Палесся праяўляе з суседнімі рэгіёнамі: з брыяфлорами Латвіі, Літвы і паўднёвага захаду Еўрапейскай Расіі, захоўваючы пры гэтым сувязі з флорами Цэнтральнай Еўропы. Выяўлены розны ўклад кожнага таксона ў даследаваную тэрыторыю. Паказана, што своеасаблівасць тэрыторый вызначаюць прадстаўнікі сямействаў Dicranaceae, Brachytheciaceae, Orthotrichaceae, Grimmiaceae, тады як падобныя таксанамічныя катэгорыі, якія маюць шырокае распаўсюджванне, не могуць вызначаць дыферэнцыяцыю таксанамічнай структуры.

Ключавыя словы: мохападобныя, брыяфлора, таксанамічны аналіз, Палессе, арэал

Введение. Таксономический анализ крупного региона предполагает его сравнение с другими территориями и является, по мнению В. А. Бакалина [1], способом выявления флористического феномена, так как любое сравнение предполагает установление определенных специфических особенностей, свойственных данной территории.

Полесье – трансграничный регион, расположенный в Центральной и Восточной Европе. С точки зрения ботанико-географического районирования Полесский регион относится к полесской подпровинции восточноевропейской широколиственно-лесной провинции [2]. Согласно геоботаническому районированию Полесье находится на стыке евроазиатской (таежной) и европейской (широколиственно-лесной) геоботанических областей, что отражает специфику флористического состава данного региона. На севере Полесье граничит с зоной темнохвойных лесов, на юге и юго-востоке – с лесостепью. В регионе представлены обильно увлажненные низменные равнины, в ландшафтах которых преобладают низинные болота и заболоченные экотопы, чередующиеся с сосновыми лесами на песках, озерами и широкими поймами [3, 4]. По флористическому районированию [5] территория расположена в пределах циркумбореальной области на стыке двух провинций – центральной и восточноевропейской.

В связи с тем что таксономический состав и структура бриофлоры Полесья определяются его эдафо-орographicкими особенностями, положением региона на юге зоны смешанных лесов европейской части Голарктики на рубеже центрально- и восточноевропейского флористических районов [5], плейстоценовой и голоценовой историей этого региона, анализ таксономического состава и проведение сравнения с другими территориями предполагает выявление степени его бриофлористических связей в пространственном отношении, особенностей генезиса бриофлоры, что позволит прогнозировать дальнейшие тенденции изменения таксономического состава и структуры полесской бриофлоры [6]. Сравнительный таксономический анализ бриофитов со многими регионами Голарктики проводился Г. Ф. Рыковским в конце 80-х гг. XX в. [6] и не был отражен в монографии по бриофлоре Полесья [4]. В настоящее время накоплен большой объем обновленной информации по бриофлоре Полесья и сопредельных регионов, была кардинально изменена систематическая структура бриофитов, что обуславливает необходимость проведения обновленного сравнительного анализа. Цель данной работы – выявление таксономических особенностей бриофлоры Полесья и ее места среди других бриофлор.

Материалы и методы. Учитывая особенности расположения Полесского региона при проведении сравнительного таксономического анализа вопреки частой критике такого подхода [7, 8] нами сопоставлялись флоры регионов, очерченных административными границами. Для репрезентативности анализа при выборе территорий для сравнения мы опирались на следующие критерии: выделены территории сходного широтного расположения по зональному типу растительности (преимущественно в зонах хвойно-широколиственных лесов); выбраны территории с достаточной изученностью, опубликованным систематическим списком (чек-листом) и сходным систематическим подходом; сопоставлены площади сравниваемых равнинных территорий в диапазоне от 65 до 140 км².

Таким образом, для детального анализа нами выбрано 7 регионов бриофлоры, относительно полно изученных и сопоставимых по систематическому составу и структуре с полесской бриофлорой: ряд территорий юго-запада Европейской России (Rus) (Московская, Калужская и Тульская обл.), а также Венгрия (Hu), Словакия (Sl), Литва (Lith), Латвия (Lat), Украинские Карпаты (UCa), территории Беларуси, не входящие в Полесье (Be).

Анализ материалов проводился согласно современным региональным сводкам мхов [9–14], а также изданию «Флора Беларуси» [15] с учетом публикаций [16–20]. В связи с тем что в настоящее время интенсивно происходит пересмотр объемов ряда таксонов, меняются таксономические концепции, принято решение использовать при анализе преимущественно таксономическую структуру М. С. Игнатова и др. [21, 22] с корректировками Г. Ф. Рыковского [23], учитывая современные таксономические подходы [9, 19, 24]. Более подробно описание используемой нами таксономической концепции Г. Ф. Рыковского изложено в монографии «Бриофлора Полесья» [4]. В частности, концепция рода *Bryum* понимается нами в широком смысле (*sensu lato*, далее – *s. l.*), в отличие от того, как трактуется данный род в современном систематическом подходе [9]. В связи с тем что информация по печеночникам (отдел *Marchantiophyta*) и антоцеротовым (отдел *Anthocerotophyta*) в региональных систематических списках чаще всего неполная, проанализированы систематический состав и структура исключительно мхов (отдел *Bryophyta*).

Статистическую обработку данных, построение диаграмм, гистограмм провели с помощью MS Excel 2010. В сравнительном анализе использованы меры включения (целое–часть) для выявления флористических связей между сравниваемыми регионами при помощи программы FDATable, порог значимости определяли по коэффициенту σ [17, 25, 26]. В качестве матрицы для анализа уровня общности использована встречаемость видов на исследуемых районах.

При сопоставлении флористических списков использован в большей степени отражающий исторические связи между флорами индекс Стургена–Радулеску, который изменяется в пределах от –1 до 0, указывая на сходство флор, а от 0 до 1 – на их различие [27, 29].

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований в Полесском регионе выявлено 476 видов мохообразных, из них из отдела Bryophyta 372 [4]. Это количество значительно превышает видовое богатство флор, расположенных восточнее зоны хвойно-широколиственных лесов, например в Московской обл. (270) [21, 22], и уступает флорам, расположенным западнее, например флоре Венгрии (466) [11] или Словакии (648) [28]. В большей степени это связано с тем, что многие близлежащие к Полесью западные территории имеют горный рельеф, который значительно обогащает видовое богатство. Важную роль играют меньшая выраженность континентальности климата, а также площадь территории и степень изученности. Данный факт можно проследить, рассматривая показатели флористического богатства сравниваемых регионов, среди которых наибольшие значения имеют Словакия (648 видов из 193 родов, 56 семейств), Украинские Карпаты (528, 177, 53) и Венгрия (466, 162, 51) (табл. 1).

На основании систематической структуры флоры нами проведен сравнительный анализ ведущих семейств рассматриваемых бриофлор, при котором наименее значимы показатели различия в площади сравниваемых территорий и флористическом богатстве, а также неполнота инвентаризации [29].

Таблица 1. Таксономический объем сравниваемых территорий

Территория	Количество таксонов		
	Вид	Род	Семейство
SI	648	193	56
UCa	528	177	53
Hu	466	162	51
Lat	443	156	48
Po	372	135	45
Lith	339	131	46
Be	319	130	45
Rus	284	110	42

В результате сравнительного анализа ведущих семейств отмечено, что первые 10 семейств во многих сравниваемых регионах сходны (табл. 2). На первом месте стоит семейство *Pottiaceae*, за исключением территорий Беларуси, не входящих в Полесье. Это обусловлено тем, что представители семейства *Pottiaceae* характерны для территорий с аридным засушливым климатом на сухих скальных субстратах. Высокая экологическая пластичность *Pottiaceae* позволяет им приспосабливаться к условиям засухи, высоким температурам и солнечной радиации. Представители этого семейства успешно произрастают как на открытых каменистых субстратах, гранитах, кварцевых породах, так и в нарушенных экотопах – в карьерах, вырубках, по обочинам дорог, на бетонных стенах и крышах домов и т. д.

Таблица 2. Ведущие десять семейств листостебельных мхов сравниваемых территорий

Семейство	Территория															
	Po		Rus		Lith		Lat		Be		UCa		SI		Hu	
	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов	Ранг	Число видов
<i>Pottiaceae</i>	1	35	1	18	1	37	1	44	2	27	1	61	1	71	1	87
<i>Sphagnaceae</i>	2–3	34	2–3	30	2	34	2	37	1	35	6	29	7	31	5–6	24
<i>Bryaceae</i>	2–3	34	2–3	21	4	25	3	34	3	25	3–5	33	3	43	3	34
<i>Brachytheciaceae</i>	4	27	4	20	3	28	5	28	4–5	24	2	36	2	45	2	36
<i>Amblystegiaceae</i>	5	26	5	22	5	22	4	30	4–5	24	3–5	33	5	36	5–6	24
<i>Dicranaceae</i>	6	18	6	16	6–7	21	7	21	7	18	7–8	26	8	29	8–9	20
<i>Orthotrichaceae</i>	7	15	–	–	10	10	8–9	18	8	16	9	21	6	32	4	25
<i>Mniaceae</i>	8	15	7	15	6–7	21	6	23	6	22	7–8	26	9	20	8–9	20
<i>Grimmiaceae</i>	9–10	15	–	–	–	–	8–9	18	10	12	3–5	33	4	39	7	23
<i>Hypnaceae</i>	9–10	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10	17	–	–
<i>Polytrichaceae</i>	–	–	8	14	8	12	10	17	9	14	10	19	–	–	–	–
<i>Mielicnhoferiaceae</i>	–	–	9–10	11	9	11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Fissidentaceae</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10	15
<i>Calliergonaceae</i>	–	–	9–10	11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Количество видов в 10 семействах		234		178		221		270		217		317		363		308
Доля таксономического объема ведущих 10 семейств в регионе, в %		66,9		62,6		65,2		60,9		68		60		56		66

Доминирование *Pottiaceae* в составе Полесья указывает на значительное влияние степной зоны, а преобладание в более северных регионах, таких как Литва и Латвия (см. табл. 2), можно объяснить увеличением показателей среднегодовых температур и проблемой общей аридизации климата [30]. Этому предшествует вырубка лесов, антропогенная трансформация и деградация земель, рост городов и т. п., что способствует увеличению нарушенных мест произрастания, которые осваивают представители данного семейства.

На втором месте семейство *Sphagnaceae*, что закономерно для территорий с болотными ландшафтами, так как большинство представителей характеризуются как влаголюбивые и обычно приурочены к переувлажненным местообитаниям бриозксплеренты, что отражает экологические особенности изучаемых регионов. В горных районах *Sphagnaceae* спускается на несколько позиций ниже (Венгрия, Словакия, Украинские Карпаты) и замещается в основном лесным семейством *Brachytheciaceae* (см. табл. 2).

Третье место во флоре листостебельных мхов сравниваемых территорий занимает семейство *Bryaceae*, которое является общераспространенным голарктическим и имеет высокое видовое разнообразие, в том числе многие представители прекрасно осваивают антропогенные субстраты и нарушенные территории.

Таким образом, первая триада семейств характерна для бриофлоры всех сравниваемых регионов.

Четвертое, пятое и шестое места в числе ведущих семейств занимают представители *Brachytheciaceae*, *Amblystegiaceae* и *Dicranaceae*, что связано с достаточным распространением лесных и увлажненных экотопов в сравниваемых регионах.

Семейства *Orthotrichaceae*, *Grimmiaceae* отражают специфику бриофлоры сравниваемых регионов. Так, *Grimmiaceae* приурочены к обнажениям скальных пород, что наблюдается на территориях с горными системами, а представители эпифитного семейства *Orthotrichaceae* достаточно теплолюбивы, поэтому более южные районы отличаются наибольшим видовым разнообразием, что сказывается на его ранговом положении (см. табл. 2).

Специфику бриофлоры и природно-климатические условия в Венгрии и России отражают замыкающие семейства их спектров. Виды семейства *Fissidentaceae* встречаются в достаточно теплых и увлажненных экотопах (Венгрия), тогда как для *Calliergonaceae*, наоборот, характерны влажные, преимущественно арктические и бореальные места произрастания (см. табл. 2).

При сопоставлении доли ведущих семейств в составе исследуемых флор обращают на себя внимание заметные различия этого показателя в регионах (см. табл. 2). Известно, что чем моложе флора, тем больше участие видов в первой десятке семейств. К таким флорам относятся флора территорий Беларуси, не входящих в Полесье, Литвы и Венгрии. По этому показателю флора Полесья занимает промежуточное положение среди сравниваемых регионов (см. табл. 2).

Рассматривая родовые спектры (табл. 3), следует отметить, что по аналогии с семейственными, первых два лидирующих рода одноименны для всех сравниваемых регионов: *Bryum* и *Sphagnum*. На третьем месте – эпифитные представители рода *Orthotrichum*, кроме сборной территории юго-запада Европейской России, что связано, на наш взгляд, с температурным режимом данного региона. К ведущим родам также относятся *Pohlia*, *Dicranum* и *Fissidens*. Род *Pohlia* для сравниваемых регионов остается одним из наиболее представительных. Мохообразные, относящиеся к этому роду, также, как и *Bryum*, являются бриозксплерентами, что определяет их высокую экологическую пластичность. Эти два рода в целом определяют лидирующие позиции семейства *Bryaceae* в спектре.

Таблица 3. Ведущие роды листостебельных мхов сравниваемых территорий

Род	Территория							
	По	Rus	Hu	Lith	Lat	Be	UCa	SI
<i>Sphagnum</i>	34	30	24	34	37	35	29	31
<i>Bryum</i>	33	20	32	24	32	24	28	37
<i>Orthotrichum</i>	13	5	20	9	14	13	14	22
<i>Pohlia</i>	12	10	10	11	13	8	11	15
<i>Dicranum</i>	10	9	10	12	14	10	16	18
<i>Fissidens</i>	10	8	15	8	12	5	13	14
<i>Plagiomnium</i>	8	7	7	7	8	7	7	7
<i>Dicranella</i>	7	6	9	8	6	7	8	9
<i>Tortula</i>	7	5	19	8	7	7	13	10
<i>Brachythecium</i>	7	8	10	7	9	7	9	11
<i>Grimmia</i>	6	4	13	3	5	5	14	18

Род	Территория							
	Po	Rus	Hu	Lith	Lat	Be	UCa	SI
<i>Didymodon</i>	6	2	12	5	7	4	9	13
<i>Plagiothecium</i>	6	6	7	9	9	6	10	7
<i>Schistidium</i>	5	3	4	2	8	2	9	9
<i>Syntrichia</i>	5	1	4	3	4	3	6	5
<i>Sciuro-hypnum</i>	5	4	4	5	5	5	5	6
<i>Polytrichum</i>	4	5	5	4	6	5	6	5

Примечание. Шрифтом выделены первых 10 доминирующих родов для каждой территории.

Анализируя родовые спектры, можно подчеркнуть несколько закономерностей. Для равнинных регионов выделено три группы ведущих родов: I – мхи болотных сообществ (*Sphagnum*); II – мхи-пионеры (*Bryum*, *Pohlia*); III – мхи лесных сообществ (*Dicranum*, *Plagiomnium*, *Brachythecium*). Для горных территорий из состава ведущих родов отмечена четвертая группа, включающая эпилитные роды *Grimmia* и *Schistidium*, а также аридный род *Tortula*, тогда как в Полесье данные роды выпадают из числа ведущих. В Полесском регионе роды *Tortula* и *Syntrichia* представлены наибольшим количеством видов среди сравниваемых равнинных территорий, что связано с влиянием аридной зоны и Карпатской горной системы на бриофлору Полесья. Отмечено также, что численность видов в родах листостебельных мхов уменьшается на рассматриваемых территориях с запада на восток и с севера на юг.

При рассмотрении родового объема бриофлор следует отметить, что наибольшие показатели характерны для горных регионов (см. табл. 1), а на равнинных территориях Полесья по данному показателю уступает Латвии, что, на наш взгляд, связано с большей изученностью бриофлоры Латвии.

Таким образом, сравнение систематической структуры регионов показывает значительную общность сравниваемых бриофлор, которая проявляется в составе как ведущих семейств, так и родов, а также их специфику, проявляющуюся в ранговом положении таксонов и количестве видов в них.

При сравнении значений коэффициента Стюгrena–Радулеску (табл. 4) выявлено, что наибольшее сходство бриофлоры Полесья проявляется с соседними флорами, расположенными севернее – Латвия (0,73) и Литва (–0,34) и восточнее – сборные территории юго-запада Европейской России (–0,30). Наибольший показатель сходства между флорами Полесья и Латвии в отличие, например, от Литвы можно объяснить высокой степенью изученности бриофлоры Латвии. Кроме того, достаточно большое количество видов, встречающихся в Полесье, формирует широкую дизъюнкцию на территории Беларуси – они полностью отсутствуют севернее Полесья и далее встречаются на территории Литвы, Латвии и др. [4].

При сравнении бриокомпонентов Полесья с другими территориями Беларуси отмечен заметный уровень специфичности первого (коэффициент сходства –0,15) в границах всей белорусской бриофлоры за счет пополнения видами горного генезиса и дизъюнкции ареалов более южных видов (см. табл. 4), что обусловлено недостаточной изученностью бриофлоры Беларуси в целом.

Таблица 4. Матрица значений коэффициента сходства флор Стюгrena–Радулеску

	Po	Rus	Hu	Lith	Lat	Be	UCa	SI
Po	1	–0,3	–0,09	–0,34	–0,73	–0,15	–0,04	–0,09
Rus	–30	1	0,14	–0,18	–0,09	–0,3	0,16	0,26
Hu	–9	14	1	0,01	–0,03	0,02	–0,11	–0,13
Lith	–34	–18	1	1	–0,3	–0,34	0,01	0,1
Lat	–73	–9	–3	–30	1	–0,25	–0,16	–0,1
Be	–15	–30	2	–34	–25	1	0,2	0,16
UCa	–4	16	–11	1	–16	20	1	–0,68
SI	–9	26	–13	10	–10	16	–68	1

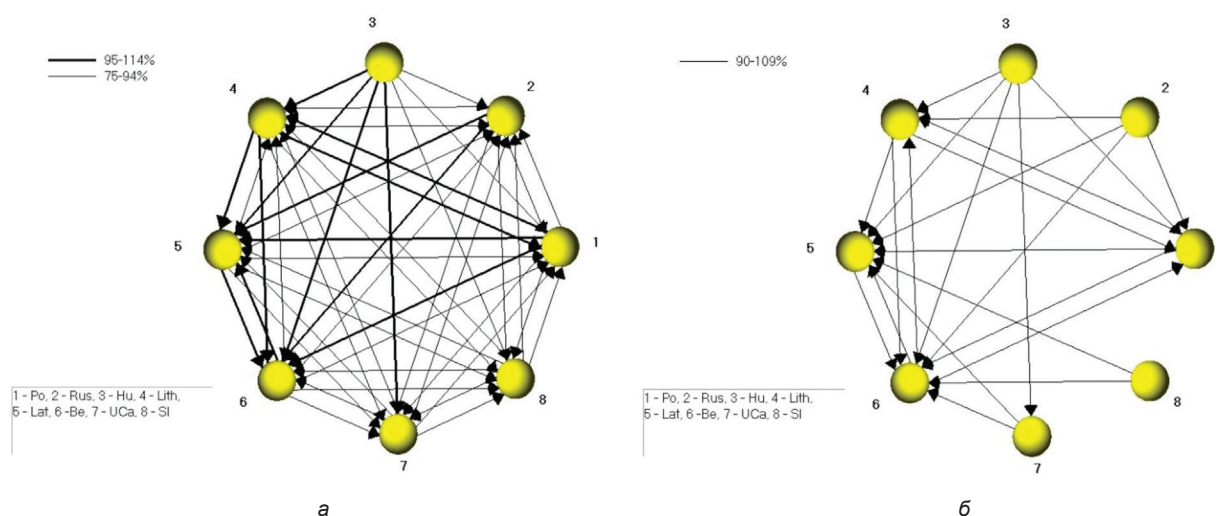
Примечание. В нижнем левом углу таблицы указаны значения коэффициента Стюгrena–Радулеску, умноженные на 100.

Сопоставление бриофлор Полесья и ряда стран Центральной Европы демонстрирует ту важную роль, которую они сыграли друг для друга в своем формировании, о чем ранее неоднократно указывал Г. Ф. Рыковский [31]. Степень бриофлористического сходства Полесья с богатыми бриофлорами Венгрии и Словакии составляет 9 %, что несколько выше, чем с бриофлорой Украинских Карпат – 4 %. Это

говорит о большем участии бриофлор Центральной Европы, чем Украинских Карпат, в формировании бриофлоры Полесья в послеледниковый период (см. табл. 4). Доля включения полесских видов в бриофлору Венгрии составляет 63 %, Словакии – 49,8 %, Украинских Карпат – 58,3 % (рисунок). Бриофлора Полесья отличается от бриофлор с горными ландшафтами преимущественно за счет представителей монтанной флоры, а также аркто-альпийского флористического комплекса.

На уровне сходства $\sigma \geq 50\%$ все флоры являются взаимно включенными, отличия выявляются при значениях $\sigma \geq 75\%$, где обособленное место занимает бриофлора Венгрии, которая на этом пороге значимости выделяется, так как является исключительной по своему видовому составу. Уровень включения Венгрии в другие бриофлоры составляет 65–70 % (см. рисунок), что указывает на существенные отличия бриофлористического состава Венгрии от других регионов, что также отражено в спектре ведущих семейств данной бриофлоры (см. табл. 2).

При уровне значимости $\sigma \geq 90\%$ выделяются территории Словакии и юго-запада Европейской России, доля включения полесских видов в бриофлору которых составляет 95 %. Меры включения полесских видов в бриофлоры Литвы, Латвии и территории Беларуси, не входящие в Полесье, составляют $\geq 90\%$ (см. рисунок). Таким образом, наиболее флористически оригинальными являются бриофлоры Латвии, территорий Беларуси, не входящих в Полесье, а также бриофлора Полесья (см. рисунок).



Ориентированный мультиграф бинарных отношений на основе множества мер включения видов мохообразных сравниваемых регионов: а – порог значимости 75 %, б – порог значимости 90 %

Заключение. В результате проведенного сравнительного анализа бриофлор отмечено, что бриофлора Полесья проявляет наибольшее сходство с бриофлорами соседних территорий, что вызвано подобием природно-климатических условий, достаточно близким их расположением и общностью развития. Широкая адаптивная радиация и проникновение представителей семейств *Bryaceae* и *Pottiaceae* определяет их достаточно высокую значимость почти во всех сравниваемых бриофлорах и в то же время непригодность данных семейств как критериев для дифференциации таксономической структуры, тогда как представители семейств *Dicranaceae*, *Brachytheciaceae*, *Orthotrichaceae*, *Grimmiaceae* и др., наоборот, определяют своеобразие исследованных территорий. Таким образом, специфику полесской бриофлоры отражают семейства и роды, занимающие более низкие позиции в таксономических спектрах. В целом таксономические спектры равнинных территорий имеют более сглаженный характер в сравнении с горными регионами, отличающимися повышенной гетерогенностью характера бриофлоры. В результате выявления флористических связей отмечено, что бриофлора Белорусского Полесья является наиболее оригинальной, а наибольшее сходство проявляет с бриофлорами Латвии, Литвы и юго-запада Европейской России, сохраняя при этом связи с флорами Центральной Европы.

Список использованных источников

1. Бакалин, В. А. Флора и фитогеография печеночников (*Marchantiophyta*, *Antocerotophyta*) Камчатки и прилегающих островов / В. А. Бакалин. – М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2009. – 367 с.
2. Растительность европейской части СССР / под ред. С. А. Грибановой и др. – Л.: Наука, 1980. – 431 с.
3. Абатуров, А. М. Полесья Русской равнины в связи с проблемами их освоения / А. М. Абатуров. – М.: Мысль, 1968. – 246 с.

4. Рыковский, Г. Ф. Бриофлора Полесья / Г. Ф. Рыковский, М. С. Малько, А. А. Сакович. – Минск: Беларус. навука, 2023. – 349 с.
5. Тахтаджян, А. Л. Флористические области земли / А. Л. Тахтаджян. – Л.: Наука, 1976. – 248 с.
6. Рыковский, Г. Ф. Происхождение и эволюция мохообразных с оценкой современного состояния и генезиса бриофлоры: дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.05 / Г. Ф. Рыковский. – Минск, 1993. – 1153 с.
7. Масловский, О. М. Бриокомплексы Беларуси в системе флор мохообразных Восточной Европы / О. М. Масловский; под ред. В. И. Парфенова, Г. Ф. Рыковского; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники имени В. Ф. Купревича. – Минск: Беларус. навука, 2022. – 532 с.
8. Камелин, Р. В. Флорогенетический анализ естественной флоры горной Средней Азии / Р. В. Камелин. – Л.: Наука, 1973. – 355 с.
9. Флора мхов России / М. С. Игнатов (отв. ред.). – М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2017. – Т. 2: *Oedipodiales – Grimmiales*. – 560 с.; 2018. – Т. 4: *Bartramiales – Aulacomniales*. – 543 с.; 2020. – Т. 5: *Hypopterygiales – Hypnales (Plagiotheciaceae – Brachytheciaceae)*. – 600 с.; 2022. – Т. 6: *Hypnales (Calliergonaceae – Amblystegiaceae)*. – 186 с.
10. Jukoniene, I. Lietuvos kiminali ir zaliosios samanų / I. Jukoniene. – Vilnius: Botanikos instituto leidykla Publ., 2003. – 402 p.
11. Erzberger, P. Annotated checklist of Hungarian bryophytes / P. Erzberger, B. Papp // *Studia Botanica Hungarica*. – 2004. – Vol. 35. – P. 91–149.
12. Boiko, M. F. The Second checklist of Bryobionta of Ukraine / M. F. Boiko // *Chornomors'k. bot. z.*, 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 426–487. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/14.104/2>.
13. Latvijas sūnu taksonu saraksts: Checklist of Latvian Bryophytes / red. A. Mežaka; L. Liepiņa. – Daugavpils: Daugavpils Universitātes Akadēmiskais apgāds "Saule", 2023. – 47 lpp.
14. Checklist and red list of mosses (Bryophyta) of Slovakia / K. Mišíková [et al.] // *Biologia*. – 2020. – № 75. – P. 21–37.
15. Рыковский, Г. Ф. Флора Беларуси. Мохообразные: в 2 т. / Г. Ф. Рыковский, О. М. Масловский. – Минск, 2004–2009. – 2 т.
16. Малько, М. С. Структура бриокомпонента хвойных лесов Беларуси: таксономия, биоморфология, экология, география, созоология / М. С. Малько, Г. Ф. Рыковский; науч. ред. В. И. Парфёнов. – Минск: Беларус. навука, 2020. – 312 с.
17. Сакович, А. А. Таксономические и эколого-географические особенности бриокомплексов бетонных фортификаций на территории Беларуси: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.01 / А. А. Сакович. – Минск, 2018. – 386 с.
18. Сакович, А. А. Сравнительный анализ бриокомплексов полесского региона / А. А. Сакович, М. С. Малько, Г. Ф. Рыковский // *Актуальные проблемы экологии: сб. науч. ст. / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ имени Янки Купалы, Гродн. обл. ком. природ. ресурсов и охраны окр. среды; редкол.: А. Е. Каревский (гл. ред.), О. В. Павлова.* – Гродно: ГрГУ, 2022. – С. 32–34.
19. Hodgetts, N. An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus / N. Hodgetts [et al.] // *J. Bryol.* – 2020. – Vol. 42, № 1. – P. 1–116.
20. Максимов, А. И. Флора мхов Карелии в составе бриофлоры Восточной Фенноскандии / А. И. Максимов // *Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: материалы Всерос. конф. (Петрозаводск, 22–27 сент. 2008 г.): в 5 ч.* – Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. – Ч. 2. – С. 316–318.
21. Ignatov, M. S. Check-list of mosses of East Europe and North Asia / M. S. Ignatov, O. M. Afonina, E. A. Ignatova // *Arctoa*. – 2006. – Vol. 15. – P. 1–130.
22. Игнатов, М. С. Флора мхов средней части европейской России / М. С. Игнатов, Е. А. Игнатова. – М.: КМК, 2003. – Т. 1. *Sphagnaceae – Hedwigiaceae*. – 608 с.; Т. 2. *Fontinalaceae – Amblystegiaceae*. – 2004. – 960 с.
23. Рыковский, Г. Ф. Современная таксономическая структура бриофлоры Беларуси / Г. Ф. Рыковский, М. С. Шабета // *Ботаника (исследования): сб. науч. тр. / Ин-т эксперим. ботаники НАН Беларуси.* – Минск: Право и экономика, 2015. – Вып. 44. – С. 85–102.
24. An annotated checklist of the mosses of Europe and Macaronesia / M. O. Hill [et al.] // *J. Bryology*. – 2006. – Vol. 28. – P. 198–267.
25. Семкин, Б. И. Об использовании биоинформационных технологий в сравнительной флористике. II. Меры включения дескриптивных множеств и их использование / Б. И. Семкин, А. П. Орешко, М. В. Горшков // *Бюл. Ботан. сада-ин-та ДВО РАН.* – 2009. – Вып. 4 – С. 58–70.
26. Семкин, Б. И. Теоретико-графовые методы в сравнительной флористике / Б. И. Семкин // *Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики: материалы II Рабочего совещ. по сравн. флористике, Неринга, 20–24 сент., 1983 г. / отв. ред. и авт. предисл. Б. А. Юрцев.* – Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1987. – С. 149–163.
27. Костина, Н. В. Применение индексов сходства и различия для районирования территорий на основе локальных флор / Н. В. Костина // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук*, 2013. – Т. 15, № 3 (7). – С. 2160–2168.
28. Ochyra, R. Sensus catalogue of polish mosses. Biodiversity of Poland. Volume 3 / R. Ochyra, J. Żarnowiec, H. Bednarek-Ochyra // *Bryologist*. – 2003. – Vol. 107. – P. 138.
29. Болюх, В. А. Сравнение флоры мхов центральной части Подолии (Украина) и сопредельных регионов / В. А. Болюх // *Arctoa*. – 1995. – Т. 4. – С. 45–54.
30. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // *Изв. Рос. акад. наук. Сер. географ.* 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
31. Рыковский, Г. Ф. Происхождение и эволюция мохообразных / Г. Ф. Рыковский. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 433 с.

Поступила 05.07.2024

Г. Г. Сушко¹, А. А. Лакотко¹, О. И. Хохлова², А. С. Ткачёнок¹, В. В. Яновская¹,
И. А. Литвенкова¹

¹Витебский государственный университет имени П. М. Машерова, Витебск, Беларусь,
e-mail: gennadis@rambler.ru, lakotko65@gmail.com, tkacенок.anastasia5@gmail.com,
viktoryayanovskaya2021@gmail.com, Inna.Litvenkova@yandex.ru

²ООО «Экопромсфера», Витебск, Беларусь, e-mail: ok.hohlowa-eco@yandex.by

ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАЗНООБРАЗИЯ АССАМБЛЕЙ ЖУЖЕЛИЦ (INSECTA, COLEOPTERA, CARABIDAE) В СОСНЯКАХ ЧЕРНИЧНЫХ (*PINETUM MYRTILLOSUM*) В БЕЛОРУССКОМ ПООЗЕРЬЕ

Аннотация. В результате проведенных исследований в сосняках черничных на минеральных и торфяных почвах в Белорусском Поозерье выявлены различия видового разнообразия в ассамблеях жуужелиц этих двух местообитаний. Анализ показателей α -разнообразия жуужелиц продемонстрировал, что видовое богатство и число особей в выборках были значительно выше ($p < 0,05$) в биотопах с минеральными почвами. Сходную тенденцию показали значения чисел Хилла (q_1 и q_2). Изучение β -разнообразия также показало высокие значимые различия (ANOSIM; $R = 0,728$, $p = 0,007$) видового состава жуужелиц в двух типах местообитаний сосняков черничных. Более высокое разнообразие жесткокрылых в сосняках на минеральных почвах обусловлено более широкой группой видов с высоким относительным обилием, среди которых *Pterostichus niger*, *Carabus hortensis*, *Calathus micropterus*, *Carabus arvensis*, *Pterostichus oblongopunctatus*, тогда как в заболоченных сосняках черничных основная доля относительного обилия приходится на два вида – *Pterostichus niger* (47,25 %) и *Carabus hortensis* (29,45 %), большинство других видов являются редкими. Видовое разнообразие жуужелиц по показателю индекса Шеннона имеет прямую значимую зависимость ($p < 0,05$) от высоты кустарничков и pH, а также обратную зависимость от проективного покрытия кустарничков.

Ключевые слова: биоразнообразие, жуужелицы, экологические условия, дифференциация видового состава, сосновые леса, *Pinetum myrtillosum*

G. G. Sushko¹, A. A. Lakotko¹, O. I. Khokhlova², A. S. Tkachenok¹, V. V. Yanovskaya¹, I. A. Litvenkova¹

¹Vitebsk State University named after P. M. Masherov, Vitebsk, Belarus,
e-mail: gennadis@rambler.ru, lakotko65@gmail.com, tkacенок.anastasia5@gmail.com,
viktoryayanovskaya2021@gmail.com, Inna.Litvenkova@yandex.ru

²ООО «Экопромсфера», Vitebsk, Belarus, e-mail: ok.hohlowa-eco@yandex.by

VARIABILITY OF DIVERSITY OF CARABID ASSEMBLAGES (INSECTA, COLEOPTERA, CARABIDAE) IN PINE FORESTS (*PINETUM MYRTILLOSUM*) IN THE BELARUSIAN LAKE DISTRICT

Abstract. As a result of the studies carried out in blueberry pine forests on mineral and peat soils in the Belarusian Lake District, differences in species diversity were revealed in the assemblages of ground beetles in these two habitats. Analysis of α -diversity measures of ground beetles demonstrated that species richness and the number of individuals in samples were significantly higher ($p < 0.05$) in biotopes with mineral soils. A similar trend was shown by the values of Hill numbers (q_1 and q_2). The study β -diversity also showed high significant differences (ANOSIM; $R = 0.728$, $p = 0.007$) in the species composition of ground beetles in the two habitat types. The higher diversity of carabids in pine forests on mineral soils is due to a wider group of species with high relative abundance, including *Pterostichus niger*, *Carabus hortensis*, *Calathus micropterus*, *Carabus arvensis*, *Pterostichus oblongopunctatus*. Whereas in swampy pine forests, the main share of relative abundance is accounted for by two species *Pterostichus niger* (47.25 %) and *Carabus hortensis* (29.45 %), and most other species are rare. The species diversity of ground beetles according to the Shannon index has a direct significant relationship ($p < 0.05$) with the height of shrubs and pH, as well as an inverse relationship with the cover of shrubs.

Key words: biodiversity, ground beetles, ecological conditions, differentiation of species composition, pine forests, *Pinetum myrtillosum*

Г. Г. Сушко¹, А. А. Лакотка¹, А. И. Хахлова², А. С. Ткачонак¹, В. У. Яноўская¹, І. А. Літвянкова¹

¹Віцебскі дзяржаўны ўніверсітэт імя П. М. Машэрава, Віцебск, Беларусь, e-mail: gennadis@rambler.ru,
lakotko65@gmail.com, tkacенок.anastasia5@gmail.com, viktoryayanovskaya2021@gmail.com, Inna.Litvenkova@yandex.ru

²ТАА «Экапромсфера», Віцебск, Беларусь, e-mail: ok.hohlowa-eco@yandex.by

ЗМЕНЛІВАСЦЬ РАЗНАСТАЙНАСЦІ АСАМБЛЕЙ ЖУЖАЛІЦ (INSECTA, COLEOPTERA, CARABIDAE) У САСНЯКАХ ЧАРНІЧНЫХ (*PINETUM MYRTILLOSUM*) У БЕЛАРУСКІМ ПААЗЕР'І

Анатацыя. У выніку праведзеных даследаванняў у сасняках чарнічных на мінеральных і тарфяных глебах у Беларускай Паазер'і выяўлены адрозненні відавоя разнастайнасці ў асамблеях жуужаліц гэтых двух месцапражыванняў. Аналіз паказчыкаў α -разнастайнасці жуужаліц прадэманстраваў, што відавоя багацце і колькасць асобін у выбарках былі значна вышэй ($p < 0,05$) у біятопах з мінеральнымі глебамі. Падабную тэндэнцыю паказалі значэнні лікаў Хіла (q_1 і q_2). Вывучэнне

β -разнастайнасці таксама падцвердзіла высокія значныя адрозненні (ANOSIM; $R = 0,728$, $p = 0,007$) відавoga складу жужаліц ў двух тыпах месцапражыванняў саснякоў чарнічных. Больш высокая разнастайнасць цвёрдакрылых у саснях на мінеральных глебах абумоўлена шырэйшай групай відаў з высокай адноснай колькасцю, сярод якіх *Pterostichus niger*, *Carabus hortensis*, *Calathus micropterus*, *Carabus arvensis*, *Pterostichus oblongopunctatus*, тады як у забалочаных саснях чарнічных асноўная доля адноснага багацця прыпадае на два віды – *Pterostichus niger* (47,25%) і *Carabus hortensis* (29,45%), большасць іншых відаў з'яўляюцца рэдкімі. Відавая разнастайнасць жужаліц па паказчыку індэкса Шэнана мае прамую значную залежнасць ($p < 0,05$) ад вышыні хмызнякоў і pH, а таксама зваротную залежнасць ад практычнага пакрыцця хмызнякоў.

Ключавыя словы: біаразнастайнасць, жужаліцы, экалагічныя ўмовы, дыферэнцыяцыя відавoga складу, сасновыя лясы, *Pinetum myrtillosum*

Введение. Сосновые леса составляют основу растительного покрова Белорусского Поозерья, где на их долю приходится 51,7 % всех лесных массивов [1]. Для северного региона Беларуси сосновые леса – один из важнейших источников биоресурсов, таких как дикорастущие ягодники, лекарственные растения, а также строительные материалы. Южно-таежные сосновые леса Белорусского Поозерья расположены на границе между евразийской зоной хвойных и европейской зоной широколиственных лесов, что обуславливает специфичность их экологических условий [2, 3]. В связи с этим исследование их биологического разнообразия и мониторинг экологического состояния представляют научный и практический интерес. Среди основных типов сосновых лесов следует обратить внимание на сосняки черничные, характеризующиеся высоким ресурсным потенциалом. В Белорусском Поозерье сосняки черничные встречаются на минеральных, как правило, дерново-подзолистых почвах, а также на заболоченных торфяных почвах. Вследствие этого под их покровом создаются различные экологические условия, определяющие видовое разнообразие консументов. Среди них можно выделить виды, ассоциированные с черникой как трофически, так и топически [4, 5]. В ряду последних следует отметить зоофагов, многие из которых, являясь представителями второго концентра в консорции черники обыкновенной, являются регуляторами численности вредителей этого значимого в аспекте биологических ресурсов растения [4].

В ряду модельных таксонов для оценки биоразнообразия перспективной группой являются жесткокрылые насекомые семейства жуужелиц, так как они обладают высоким видовым богатством и численностью, относительно невысокой мобильностью. Жуужелицы – одни из самых характерных обитателей подстилки и напочвенного покрова, имеют значительную приуроченность к определенным типам лесов, а также входят в группу наиболее многочисленных консументов в трофических сетях сосновых лесов [6–9]. Вследствие этого как зоофаги они играют важную роль в регуляции численности вредителей леса и являются общепризнанными биологическими индикаторами [10].

Целью данной работы было исследование видового разнообразия жуужелиц в сосняках черничных, произрастающих на почвах различных типов, различающихся экологическими условиями.

Материал и методы. Исследования проводились в 2020–2022 гг. на шести стационарах на территории Витебского, Сенненского, Городокского и Миорского районов Витебской области в сосняках черничных на минеральных дерново-подзолистых и торфяно-болотных почвах. Сборы насекомых проводили с помощью почвенных ловушек, в качестве которых взяты пластиковые стаканчики диаметром 72 мм. Жуужков собирали с интервалом 10–14 дней с середины апреля до начала ноября. В качестве фиксатора использовалась 9%-я уксусная кислота. В качестве единицы учета (выборки) использовались три ловушки, данные с которых в течение сезона исследований объединялись для последующего статистического анализа. Всего в каждом стационаре было получено по 45 выборок.

Измерения экологических показателей проводились на площадках 1×1 м 3 раза в течение сезона исследований (в начале мая, начале июля и сентябре). Площадки закладывали рядом с установленными ловушками. Были описаны высота и общее проективное покрытие (%) травяно-кустарничкового яруса, pH и влажность гумусового слоя. Проективное покрытие оценивали методом фотоплощадок [11]. Для оценки данных показателей были взяты образцы почвы на глубине 10 см, исключая подстилку и слои ферментации. Кислотность измерялась pH-метром Hanna Instruments HI 8314. Влажность оценивалась с помощью термогравиметрического метода: образцы почвы собирались в алюминиевые бюксы, затем взвешивались на аналитических весах и высушивались в течение 24 ч в сушильном шкафу при температуре 65 °C и снова взвешивались.

Оценка различий между выборками проводилась с применением теста Манна–Уитни. Для оценки α -разнообразия использованы числа Хилла (Hill's numbers), графическое отображение которых демонстрирует отличие основных показателей разнообразия. Первое число Хилла ($q = 0$) оценивает видовое богатство и предсказывает его ожидаемое максимально возможное значение с помощью метода экстраполяции. Второе число Хилла ($q = 1$) является экспонентой энтропийного индекса Шеннона (H'). Третье число Хилла ($q = 2$) отражает обратный индекс концентрации Симпсона ($1 - D$) [16]. Непараметрический тест ANOSIM был применен для сравнения видового состава жуужелиц в сосняках с различными эдафическими условиями (β -разнообразии). Для визуализации различий видового состава использовали

ординацию – неметрическое многомерное шкалирование (NMDS) с расстоянием Брэя–Кертиса. Степень биотопической приуроченности видов выявлялась с помощью статистической процедуры IndVal (Indicator Value). Значения индекса IndVal могут варьировать от 0 (не является индикаторным видом) до 1 (идеальный индикатор) при статистической значимости $p < 0,05$ [12].

Выявление зависимостей учетного видового разнообразия от измеренных экологических факторов выполняли с помощью регрессионного анализа, который выполнялся с использованием статистической среды R 4.0.5 (пакеты labdsv и vegan) [12], пакетов анализа PAST 4.11 [13] и iNEXT [14].

Результаты и их обсуждение. В результате рассмотрения измеренных экологических переменных выявлено, что проективное покрытие кустарничкового яруса, представленного черникой обыкновенной, не различалось значимо ($U = 1,47, p = 0,08$) в исследуемых сосновых лесах с разными эдафическими условиями. Высота яруса была намного ($U = 3,71, p = 0,001$) выше в сосняках на минеральных почвах, тогда как кислотность ($U = 3,74, p = 0,001$) и влажность ($U = 4,62, p = 0,03$) были значимо выше в заболоченных сосняках (табл. 1). Выявленные различия измеренных экологических факторов указывают на дифференциацию условий обитания в сосняках черничных на различных типах почв.

Таблица 1. Средние значения измеренных экологических факторов в сосняках черничных на минеральных и торфяных почвах

Переменная	Сосняк черничный	
	Минеральная почва	Торфяная почва
Высота кустарничкового яруса (см) ***	31,2 ± 1,75	17,1 ± 1,47
Проективное покрытие кустарничков (%)**	73,9 ± 4,79	61,1 ± 6,24
pH***	6,60 ± 0,12	3,81 ± 0,05
Влажность гумусового слоя (%) *	14,67 ± 1,29	23,07 ± 1,42

Примечание. Уровень статистической значимости на основе теста Манна–Уитни: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

Анализ показателей α -разнообразия жужелиц продемонстрировал, что видовое богатство ($t = 4,11, p = 0,003$) (рис. 1, а) и число особей ($t = 2,82, p = 0,022$) (рис. 1, б) в выборках были значимо выше в биотопах с минеральными почвами.

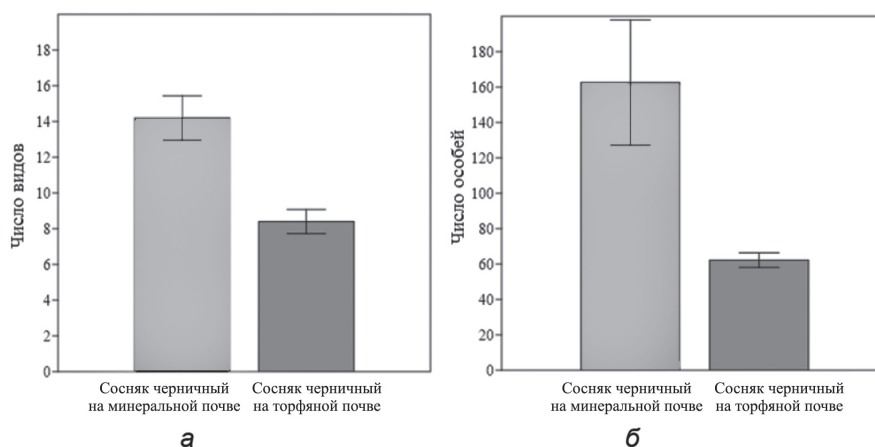


Рис. 1. Видовое богатство и число особей в выборках жужелиц (Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных (*Pinetum myrtillosum*) на минеральных и торфяных почвах

Видовое разнообразие показало сходную тенденцию. Наибольшим разнообразием как по показателям индекса Шеннона (q_1), так и по показателям инверсного индекса Симпсона (q_2) отличались ассамблеи жужелиц сосняков черничных на минеральных почвах (рис. 2). Если оценивать полноту выборочных усилий по видовому богатству, отталкиваясь от числа Хилла (q_0), экстраполяция числа видов указывает на то, что в двух типах местообитаний присутствуют не выявленные нами виды (кривые не имеют формы асимптоты). Эстиматор видового богатства ACE показал, что в сосняках на минеральных почвах может быть выявлено еще три вида ($ACE = 17,0 \pm 0,06$), а в заболоченных сосняках может быть потенциально обнаружено еще четыре вида ($ACE = 13,0 \pm 2,18$). Кривые, соответствующие q_1 и q_2 , как разреженные, так и экстраполированные имеют наклон в форме асимптоты. Это говорит о том, что выявленное разнообразие жужелиц небольшое и в высокой степени соответствует реальному многообразию данных местообитаний.

Более высокое разнообразие жесткокрылых в сосняках на минеральных почвах обусловлено более широкой группой видов с высоким относительным обилием, среди которых *Pterostichus niger* (27,43 %), *Carabus hortensis* (25,66 %), *Calathus micropterus* (15,80 %), *Carabus arvensis* (7,84 %), *Pterostichus oblongopunctatus* (6,45 %). В заболоченных сосняках черничных основная доля относительного обилия приходится на два вида *Pterostichus niger* (47,25 %) и *Carabus hortensis* (29,45 %), большинство других видов являются редкими (табл. 2).

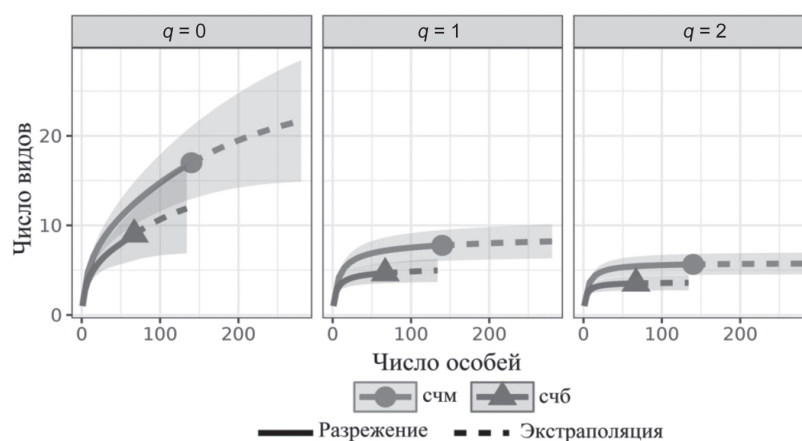


Рис. 2. Кривые разрежения (сплошная линия) и экстраполяции (пунктирная линия) на основе чисел Хилла ассамблей жуков (Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных на минеральных (счм) и торфяных (счб) почвах: $q = 0$ – видовое богатство, $q = 1$ – экспоненциальный индекс Шеннона, $q = 2$ – инверсный индекс Симпсона

Таблица 2. Относительное обилие (%) ассамблей жуков (Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных на минеральных и торфяных почвах

Вид	Сосняк черничный	
	Минеральная почва	Торфяная почва
<i>Carabus coriaceus</i>	0,51	0,00
<i>Carabus violaceus</i>	5,69	0,00
<i>Carabus glabratus</i>	2,15	0,00
<i>Carabus hortensis</i>	25,66	29,45
<i>Carabus granulatus</i>	0,13	3,24
<i>Carabus arvensis</i>	7,84	0,00
<i>Cychris caraboides</i>	4,55	6,80
<i>Leistus terminatus</i>	0,00	2,27
<i>Notiophilus palustris</i>	0,00	0,97
<i>Pterostichus oblongopunctatus</i>	6,45	1,29
<i>Pterostichus niger</i>	27,43	47,25
<i>Pterostichus melanarius</i>	0,63	0,32
<i>Pterostichus aethiops</i>	2,15	0,00
<i>Pterostichus nigrita</i>	0,38	0,00
<i>Pterostichus minor</i>	0,13	0,65
<i>Pterostichus rhaeticus</i>	0,13	6,15
<i>Calathus micropterus</i>	15,80	0,32
<i>Agonum ericeti</i>	0,00	1,29
<i>Amara brunnea</i>	0,38	0,00

Изучение β -разнообразия проиллюстрировало высокие значимые различия (ANOSIM; $R = 0,728$, $p = 0,007$) видового состава жуков в двух типах местообитаний сосняков черничных. Ординация с помощью неметрического многомерного шкалирования подтвердила высокий уровень дифференциации (стресс – 0,05) ассамблей жуков (рис. 3).

С местообитаниями на минеральных почвах в наибольшей степени были ассоциированы *Carabus arvensis* (IndVal = 99,75, $p = 0,001$) и *Calathus micropterus* (IndVal = 99,21, $p = 0,003$), а с заболоченными сосняками – тирфофильный вид, приуроченный к верховым болотам, *Pterostichus rhaeticus* (IndVal = 81,23, $p = 0,004$) (рис. 4).

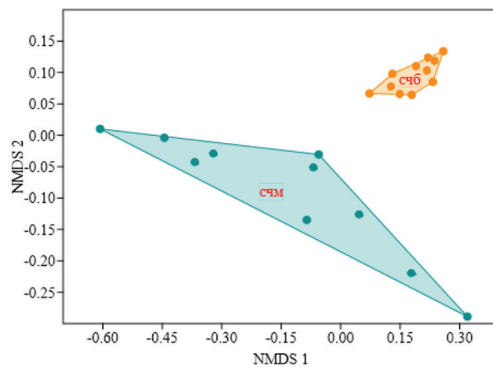


Рис. 3. Диаграмма ординации (NMS) ассамблей жукелиц (Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных на минеральных (счм) и торфяных (счб) почвах

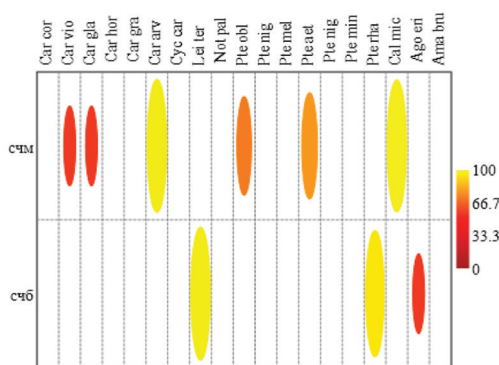


Рис.4. Анализ индикаторной значимости (IndVal, %) видов жукелиц (Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных на минеральных (счм) и торфяных (счб) почвах; показаны виды со значимыми IndVal ($p < 0,05$)

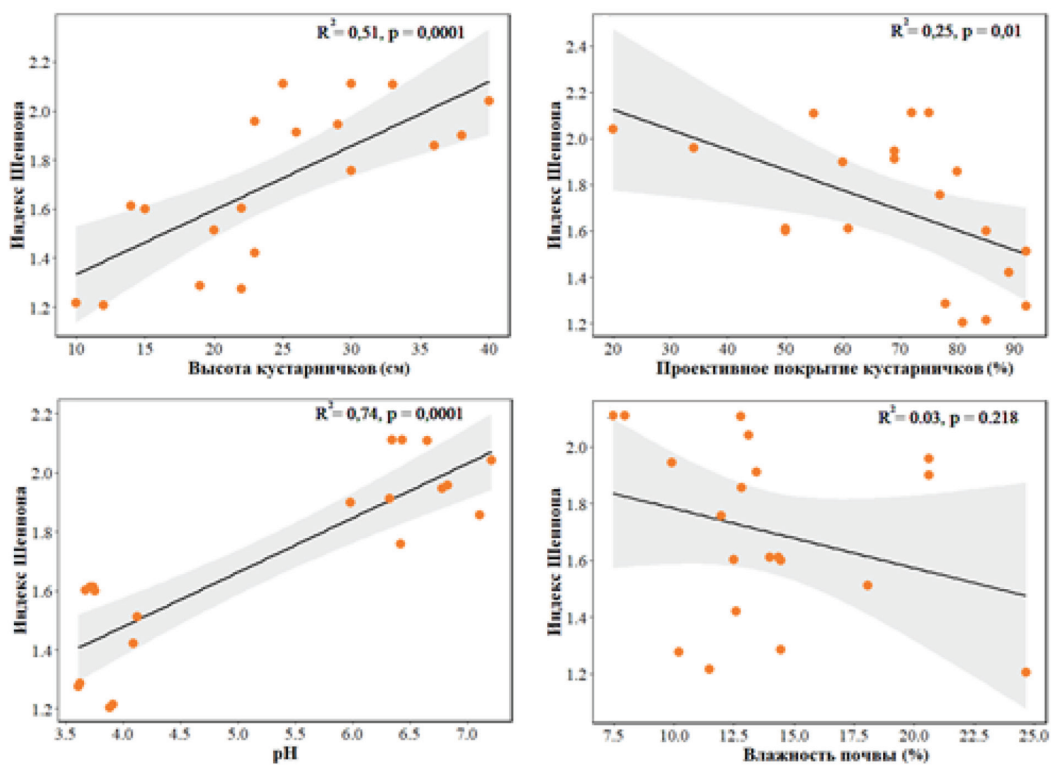


Рис. 5. Влияние измеренных факторов среды на видовое разнообразие ассамблей жукелиц (Coleoptera, Carabidae) в сосняках черничных на минеральных и торфяных почвах

Выполненный регрессионный анализ показал, что значимое влияние на видовое разнообразие по показателю индекса Шеннона оказывают кроме влажности почвы измеренные факторы местообитаний в сосняках на минеральных и торфяных почвах (рис. 5). В частности, видовое разнообразие имеет прямую зависимость от высоты кустарничков ($R^2 = 0,51$, $p = 0,0001$) и pH (снижения кислотности) ($R^2 = 0,74$, $p = 0,0001$), а также обратную зависимость от проективного покрытия кустарничков ($R^2 = 0,25$, $p = 0,01$). Однако в последнем случае значение коэффициента детерминации невысоко, что указывает на слабую степень связи между переменными (см. рис. 5). Важность фитоценологических показателей и pH для видового разнообразия эпигейных насекомых показана и в других исследованиях сосняков различных типов [16, 17].

Заключение. В результате проведенных исследований в сосняках черничных на минеральных и торфяных почвах в Белорусском Поозерье выявлены различия видового разнообразия в ассамблеях жуужелиц этих двух местообитаний. Анализ показателей α -разнообразия жуужелиц продемонстрировал, что видовое богатство и число особей в выборках были значимо выше ($p < 0,05$) в биотопах с минеральными почвами. Видовое разнообразие показало сходную тенденцию на основании значений чисел Хилла ($q\ 1$ и $q\ 2$). Анализ β -разнообразия также показал высокие значимые различия (ANOSIM; $R = 0,728$, $p = 0,007$) видового состава жуужелиц в двух типах местообитаний сосняков черничных. Более высокое разнообразие жесткокрылых в сосняках на минеральных почвах обусловлено более широкой группой видов с высоким относительным обилием, среди которых *Pterostichus niger*, *Carabus hortensis*, *Calathus micropterus*, *Carabus arvensis*, *Pterostichus oblongopunctatus*, тогда как в заболоченных сосняках черничных основная доля относительного обилия приходится на два вида – *Pterostichus niger* (47,25 %) и *Carabus hortensis* (29,45 %), большинство других видов являются редкими. Видовое разнообразие жуужелиц по показателю индекса Шеннона имеет прямую значимую зависимость ($p < 0,05$) от высоты кустарничков и pH, а также обратную зависимость от проективного покрытия кустарничков.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы в рамках подпрограммы 10.2 «Биоразнообразие, биоресурсы, экология», задания 2.01 № ГР 20210710 от 14.04.2021.

Список использованных источников

1. Ловчий, Н. Ф. Кадастр типов сосновых лесов Белорусского Поозерья / Н. Ф. Ловчий, А. В. Пучило, В. Д. Гуцевич. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 194 с.
2. Гельтман, В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В. С. Гельтман. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
3. Цвирко, Р. В. Современное состояние и динамика сосновой формации подзоны грабово-дубово-темнохвойных лесов Беларуси / Р. В. Цвирко // Природные ресурсы. – 2011. – № 1. – С. 64–72.
4. Мазинг, В. В. Консорции как элементы функциональной структуры биоценозов / В. В. Мазинг // Тр. Моск. о-ва испытателей природы. – М., 1966. – С. 127–177.
5. Литвинова, А. Н. Насекомые сосновых лесов / А. Н. Литвинова, Т. П. Панкевич, Р. В. Молчанова. – Минск: Навука і тэхніка, 1985. – 152 с.
6. Яхонтов, В. В. Экология насекомых / В. В. Яхонтов. – М., 1964. – 460 с.
7. Sushko, G. Spatial distribution of epigeic beetles (Insecta, Coleoptera) in the "Yelnia" peat bog / G. Sushko // Balt. J. Coleopterol. – 2014. – Vol. 14, № 2. – P. 151–161.
8. Sushko, G. Diversity patterns of carabid beetle (Coleoptera, Carabidae) assemblages in the pine forest of Northern Belarus / G. Sushko, A. Lakotko, A. Miakinikova // Balt. J. Coleopterol. – 2020. – Vol. 20, № 2. – P. 225–234.
9. Лакотко, А. А. Вырубки линий электропередач в сосновых лесах – как местообитания жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) в Белорусском Поозерье / А. А. Лакотко, Г. Г. Сушко // Экология. БГУ. – 2021. – № 1. – С. 15–28.
10. Rainio, J. Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. / J. Rainio, J. Niemelä // Biodiversity and Conservation. – 2003. – № 12. – P. 487–506.
11. Бузук, Г. Н. Методы учета проективного покрытия растений: сравнительная оценка с использованием фото-плоток / Г. Н. Бузук, О. В. Созинов // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2014. – Т. 1, № 5 (5). – С. 1644–1649.
12. McCune, B. Analysis of ecological communities. / B. McCune, J. B. Grace. – MjM Software Design, Gleneden Beach, 2002. – 98 p.
13. R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. Version 4.0.5 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.R-project.org>. – Date of access: 01.07.2023.
14. Hammer, Ø. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis / Ø. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // Palaeontol. Electron. – Vol. 4, iss. 1. – 2001. – P. 4–9.
15. Anne Chao's Website (2020) iNEXT software [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.chao.shinyapps.io/iNEXT>. – Date of access: 21.08.2023.
16. Sushko, G. G. Diversity and species composition of beetles in the herb-shrub layer of a large isolated raised bog in Belarus / G. G. Sushko // Mires and Peat. – 2017. – Vol. 19, № 10. – P. 1–14.
17. Sushko, G. Key factors affecting the diversity of sphagnum cover inhabitants with the focus on ground beetle assemblages in Central-Eastern European peat bogs / G. Sushko // Community ecology. – 2019. – Vol. 20, № 1. – P. 45–52.

Поступила 23.06.2024

Е. С. Шавалда¹, А. В. Судник¹, Н. С. Юшин², И. И. Зиньковская²¹Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: e.shavalda@gmail.com, asudnik@tut.by²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация,
e-mail: ynik_62@mail.ru, inga@jinr.ru**СТРУКТУРА ПРИДОРОЖНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ СООБЩЕСТВ
В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

Аннотация. Отмечены растительные сообщества, встречающиеся вдоль полосы отвода автодорог Минска и Минской обл., и условия их произрастания с учетом химического загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами (Cd, Co, Cu, Ni, Pb и Zn). Придорожные фитоценозы преимущественно относятся к классам *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* и *Molinio-Arrhenatheretea*. Распределение сообществ в полосе отвода экспозиций «выемка», «насыпь» и «нулевое положение» имело мозаичный характер вследствие различной сохранности почвенного покрова, степени его эрозии и загрязненности, общего антропогенного воздействия. Антропогенный характер загрязнения полосы отвода (автотранспорт, дорожное покрытие) подтверждается преимущественным накоплением тяжелых металлов в верхнем горизонте (0–10 см) в отличие от нижнего (10–20 см) и снижением концентрации элементов по мере удаления от дорожного полотна. На основе отмеченных фитоценозов предложен список растений для использования в придорожных травосмесях, обладающих устойчивостью к комплексу антропогенных факторов (эрозия, кошение, загрязнение тяжелыми металлами и др.).

Ключевые слова: придорожная растительность, полоса отвода, тяжелые металлы, загрязнение почвы, придорожный газон

Ya. S. Shavalda¹, A. V. Sudnik¹, N. S. Yushin², I. I. Ziniovskaia²¹V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: e.shavalda@gmail.com, asudnik@tut.by²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation, e-mail: ynik_62@mail.ru, inga@jinr.ru**STRUCTURE OF ROADSIDE GRASS COMMUNITIES UNDER CONDITIONS
OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS**

Abstract. This study examines the plant communities found along the road right of way in Minsk and the Minsk region, as well as the conditions for their growth. In particular, it takes into account the chemical contamination of the soil with heavy metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn). The roadside phytocenoses are mainly classified as belonging to the classes *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* and *Molinio-Arrhenatheretea*. The distribution of communities in the right-of-way of the “Notch,” “Embankment,” and “Zero position” exposure exhibited a mosaic character due to the varying preservation of the soil cover, the degree of its erosion and pollution, and the general anthropogenic impact. The anthropogenic nature of right-of-way pollution (motor transport, road surface) is corroborated by the predominant accumulation of heavy metals in the upper horizon (0–10 cm) in contrast to the lower horizon (10–20 cm) and a decrease in concentration with distance from the road surface. Based on the noted phytocenoses, a list of suitable plants for use in roadside grass mixtures that are resistant to a complex of anthropogenic factors is proposed (erosion, mowing, pollution with heavy metals, etc.).

Keywords: roadside vegetation, right-of-way, heavy metals, soil pollution

Я. С. Шавалда¹, А. У. Суднік¹, Н. С. Юшын², І. І. Зінькоўская²¹Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: e.shavalda@gmail.com, asudnik@tut.by²Аб'яднаны інстытут ядзерных даследаванняў, Дубна, Расійская Федэрацыя, e-mail: ynik_62@mail.ru, inga@jinr.ru**СТРУКТУРА ПРЫДАРОЖНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ ЗГУРТАВАННЯЎ
ВА ЎМОВАХ ЗАБРУДЖАНАСЦІ ГЛЕБ ЦЯЖКІМІ МЕТАЛАМІ**

Анотацыя. Адзначаны раслінныя згуртаванні, якія сустракаюцца ўздоўж паласы адводу аўтадарог Мінска і Мінскай воб., і ўмовы іх росту з улікам хімічнага забруджвання глебавага покрыва цяжкімі металамі (Cd, Co, Cu, Ni, Pb і Zn). Прыдарожныя фітацэнозы пераважна адносяцца да класаў *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* і *Molinio-Arrhenatheretea*. Размеркаванне згуртаванняў у паласе адводу экспазіцый «выемка», «насып» і «нулявое становішча» мела мазаічны характар па прычыне рознай захаванасці глебавага покрыва, ступені яго эрозіі і забруджванасці, агульнага антрапагеннага ўздзеяння. Антрапагенны характар забруджвання паласы адводу (аўтатранспарт, дарожнае пакрыццё) пацвярджаецца пераважным назапашваннем цяжкіх металаў у верхнім гарызонце (0–10 см) у адрозненне ад ніжняга (10–20 см) і зніжэннем канцэнтрацыі элементаў па меры аддалення ад дарожнага палатна. На аснове адзначаных фітацэнозаў прапанаваны спіс раслін для выкарыстання ў прыдарожных травасумесях, якія валодаюць устойлівасцю да комплексу антрапагенных фактараў (эрозія, кашэнне, забруджванне цяжкімі металамі і інш.).

Ключавыя словы: прыдарожная расліннасць, паласа адводу, цяжкія металы, забруджванне глебы

Введение. Структура придорожных фитоценозов определяется множеством факторов: конструкцией полосы отвода, интенсивностью движения автотранспорта, периодичностью и качеством проводимых мероприятий по уходу, степенью эрозии и загрязненности почв, типом примыкающих экосистем и др. Данные сообщества характеризуются нестабильностью флористического состава, проявляющейся в специфических диагностических процессах (сукцессионные изменения) в ответ на внутри- и межсезонные изменения условий в полосе отвода, например, из-за изменения ежегодного регламента мероприятий (кошение, засевание семян и подсыпание почвогрунта) [1]. Сложная конструкция полосы отвода с наличием откосов и кюветов приводит к развитию растительности с широкой экологической валентностью и антропоустойчивостью [2]. Особое влияние на создание придорожного газона оказывают использование травосмесей из многолетних злаков и обилие синантропных видов, в том числе адвентивных (инвазивных).

Важным фактором произрастания придорожных фитоценозов является химическое загрязнение тяжелыми металлами (ТМ), среди которых наблюдается превышение базовых величин Cd, Co, Cu, Ni, Pb и Zn. Фитотоксичность комплекса данных элементов слабо изучена, а их совместное действие способно проявляться в виде синергизма. Распространение ТМ происходит преимущественно воздушным путем с последующим накоплением в почве и миграцией между почвенными горизонтами. Типичными признаками поражения растений высокими концентрациями ТМ являются: снижение активности ферментов дыхания и фотосинтеза, поступления ряда веществ в клетки и ткани растений, задержка роста и повреждение корневой системы и хлороз (Cd (1–13 мг/кг)); снижение фотосинтеза и транспирации, хлороз, желтая пятнистость с последующим некрозом, «уродливые» формы, задержка роста корней и молодых побегов (Ni (30–100 мг/кг)); снижение дыхания и фотосинтеза, увеличение поступления Cd и снижение Zn в тканях растений, увядание, темно-зеленая окраска листьев (Pb (100–500 мг/кг)); хлороз молодых листьев и побегов (Zn (140–250 мг/кг)) [3, 4].

В структуре фитоценозов в условиях постоянного химического загрязнения наблюдается угнетение аборигенной растительности с формированием специфических сообществ нарушенных территорий с доминированием рудеральных (сорные, адвентивные) видов [5]. Изменение концентрации ТМ в почве приводит к дифференциации некоторых аборигенных видов [6]. Для двулетних и многолетних трав высокая загрязненность почв приводит к уменьшению биометрических параметров растения [7].

Необходимо отметить, что минимальное повышение концентрации в почве комплекса ТМ может не приводить к отрицательному воздействию на структуру растительности. Негативное действие этих элементов начинается только при возрастании их концентрации выше порога токсичности [8]. В придорожных биогеоценозах определить влияние ТМ на состав и структуру растительных сообществ затруднительно из-за комплексного действия элементов и невозможности учета всех природных и антропогенных факторов, поэтому на придорожных территориях следует учитывать вероятностную устойчивость фитоценозов к способности произрастать на почвах с определенным уровнем химического загрязнения.

Материалы и методы исследований. Предметом исследования является оценка уровня загрязненности ТМ (Cd, Co, Cu, Ni, Pb и Zn) почвогрунтов для придорожных фитоценозов с указанием их синтаксонов и условий произрастания [9]. В качестве репрезентативных было выбрано девять участков вдоль полосы отвода с различной интенсивностью дорожного движения (рис. 1). Учитывая преобладание западных и юго-западных направлений воздушных масс, отбор почвы проводился в пределах полосы отвода только с подветренной относительно автодороги стороны, испытывающей преимущественное загрязнение от автодороги. С учетом конструкции полосы отвода участки исследования были разделены на следующие экспозиции: в «выемке» отбор проводился с четырех секторов: 1 – прилегающая к дороге полоса 0,5–1,5 м; 2 – кювет; 3 – склон; 4 – внешняя бровка выемки (2–4 м); в «насыпи» и «нулевом положении» выделены три сектора: 1 – прилегающая к дороге полоса 0,5–1,5 м; 2 – склон и кювет; 3 – подошва насыпи или кювета (2–10 м) [10, 11]. В каждом секторе выполнялся отбор образцов почвы на глубине 0–10 см и 10–20 см. Всего отобрано 60 образцов.

Дальнейшая подготовка, химический и спектральный анализы образцов проводились на спектрометре PlasmaQuant 9000 Elite в секторе нейтронного активационного анализа и прикладных исследований отделения ядерной физики Лаборатории нейтронной физики имени И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Российская Федерация). Для сравнения данных загрязненности почвы ТМ использовались санитарно-гигиенические (ПДК, ОДК) нормативы и средние (кларк) значения ТМ (табл. 1) [12–16]. Определение зависимости накопления ТМ в почве между секторами осуществлялось с помощью коэффициента корреляции (r). Анализ данных выполнен с помощью программы Microsoft Excel, данные представляли в форме среднего арифметического значения и его стандартной ошибки ($M \pm m$).

Экологически опасный уровень концентрации ТМ в почвогрунте был рассчитан с помощью коэффициента опасности (K_o) [17, 18]:

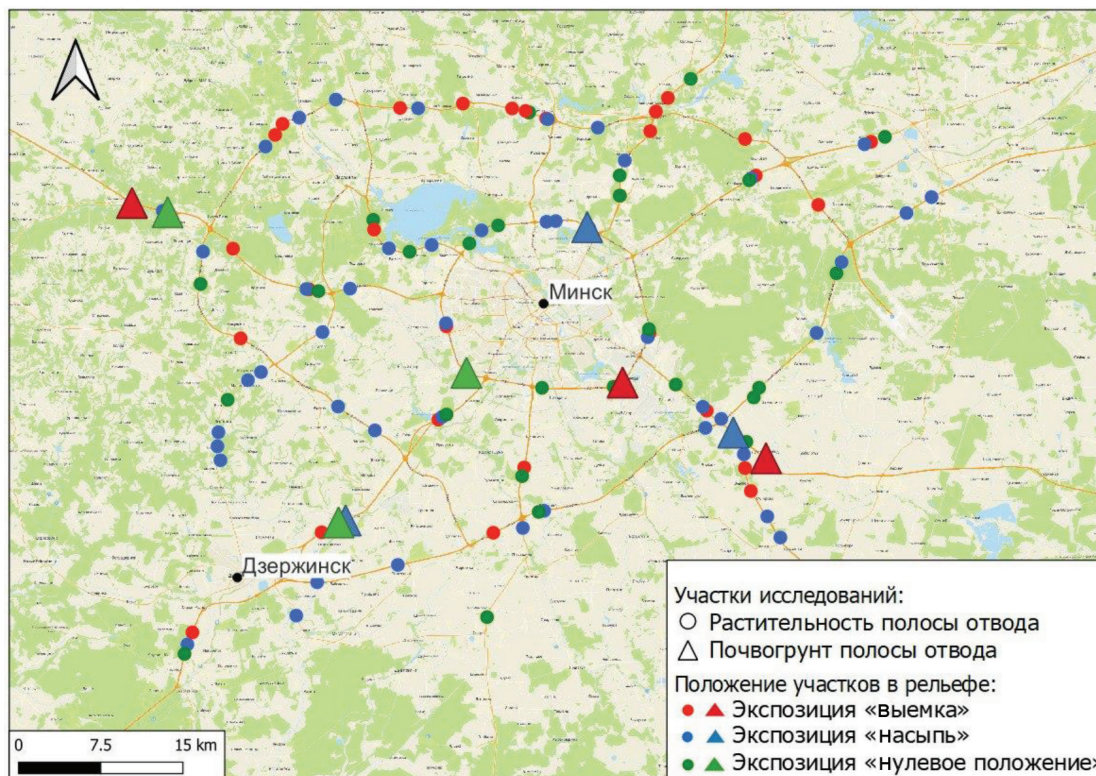


Рис. 1. Местоположение участков исследования придорожной травянистой растительности с учетом отбора почвенных образцов

Таблица 1. Показатели концентрации тяжелых металлов в почве (валовое содержание)

Норматив содержания химического элемента в почве	Cd (мг/кг)	Co (мг/кг)	Cu (мг/кг)	Ni (мг/кг)	Pb (мг/кг)	Zn (мг/кг)
ПДК [12, 13, 15]	0,5	12	33	85	32	100
ОДК (ПДК) [13,16]	0,5	5	33	20	30	55
Кларк [14]	0,1	6	13	20	12	35

$$K_o = \frac{C_{\text{образец}}}{C_{\text{фон}}}$$

где $C_{\text{образец}}$ – концентрация ТМ в отобранном образце почвы, мг/кг; $C_{\text{фон}}$ – фоновое содержание ТМ (кларк) (табл. 1), мг/кг.

Оценка степени загрязнения почвогрунтов комплексом ТМ проводилась с помощью суммарного показателя (уровня) загрязненности (Z_c) [17, 18]:

$$Z_c = \sum K_o - (n - 1),$$

где K_o – коэффициент опасности ТМ; n – количество исследуемых ТМ.

Анализ Z_c проводился по следующим категориям: допустимый – $K_o < 8$; низкий – $K_o = 8-16$; средний – $K_o = 16-32$; высокий – $K_o = 32-128$; очень высокий – $K_o > 128$.

С целью установления вероятностных адаптационных возможностей фитоценозов произрастать на территориях с определенным уровнем химического загрязнения дополнительно закладывались 112 эколого-фитоценологических профилей в полосе отвода с разделением по соответствующим экспозициям и секторам. Определялся видовой состав [19] и принадлежность сообществ к синтаксонам с помощью методологии Й. Браун–Бланке (см. рис. 1) [20]. Таким образом, оценивался уровень загрязненности почв и встречающиеся синтаксоны для каждого сектора экспозиций с учетом конструкции полосы отвода и по мере удаления от дорожного полотна.

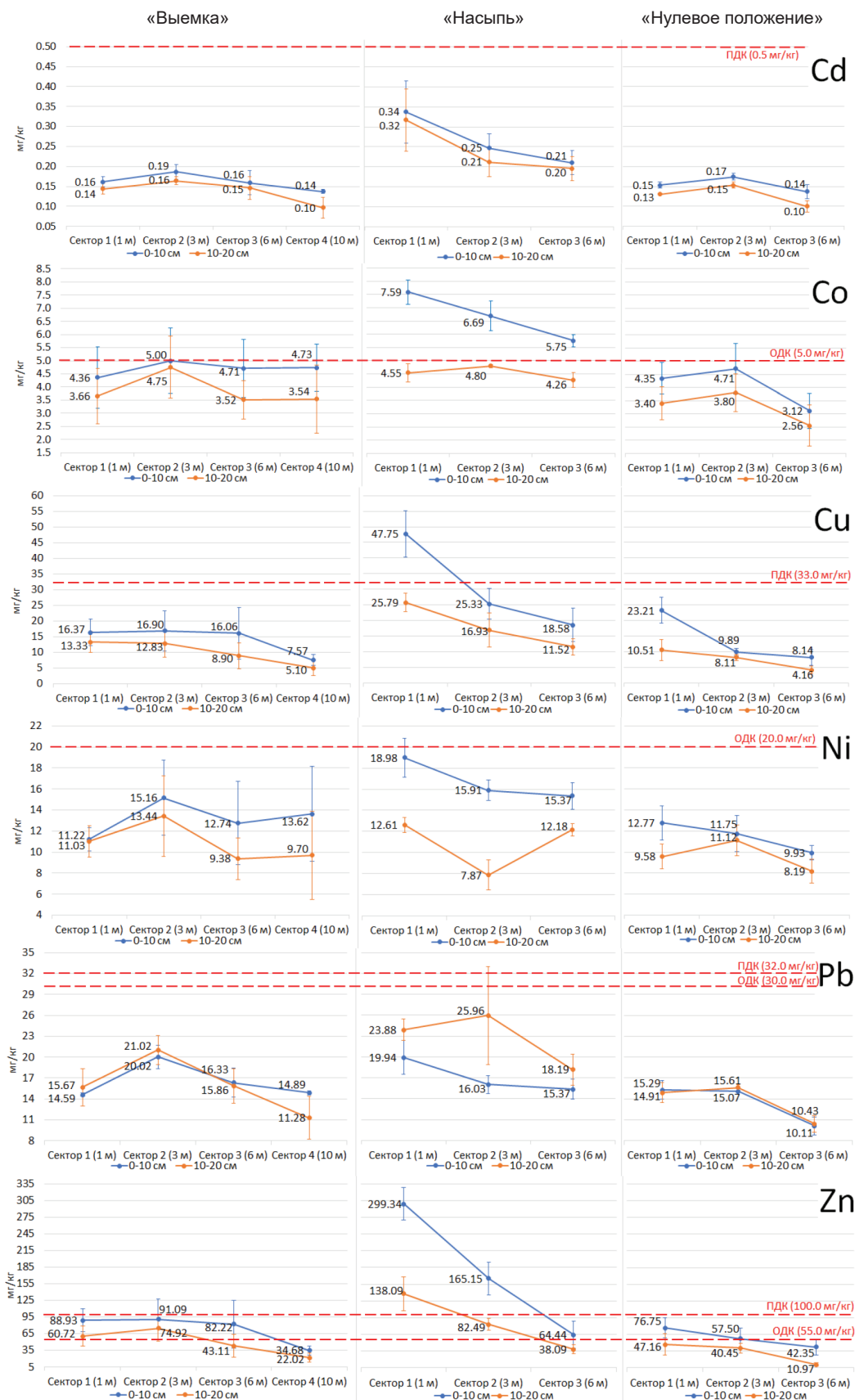


Рис. 2. Распределение ТМ в почвогрунтах полосы отвода автодорог с учетом положения участков исследования в рельефе и относительно дорожного полотна

Результаты и их обсуждение. Кадмий (Cd). Средние концентрации элемента в почвах находятся в пределах 0,1–0,34 мг/кг (рис. 2, табл. 2), при этом содержание Cd во всех экспозициях не превышает ПДК и ОДК (0,5 мг/кг). В экспозиции «насыпь» отмечено снижение концентрации элемента по мере удаления от дорожного полотна ($r = 0,9$ при $p < 0,05$), а в «выемке» – увеличение концентрации элемента на откосах (сектор 3) с накоплением в кюветах (сектор 2) ($r = 0,9$ при $p < 0,05$). Наибольшая средняя загрязненность характерна для «насыпи» – в 1,7 раза выше остальных экспозиций. Средняя концентрация в секторах и на глубине отбора во всех экспозициях превышала кларковые значения (0,1 мг/кг), кроме результатов нижележащих горизонтов наиболее отдаленных секторов «выемки» и «нулевого положения» – $0,1 \pm 0,03$ мг/кг.

Кобальт (Co). Диапазон средних концентраций Co составил 2,56–7,59 мг/кг. Для «насыпи» отмечена наибольшая загрязненность – концентрация в верхнем горизонте (0–10 см) превышала ОДК (5 мг/кг) в 1,2–1,5 раза со снижением по мере удаления от дорожного полотна (см. рис. 2, табл. 2). Средняя загрязненность верхнего горизонта (0–10 см) во всех экспозициях была выше в 1,3 раза – на 1,22 мг/кг нижнего горизонта (0–10 см). Положительная корреляция ($r = 0,9$ при $p < 0,05$) показывает равномерную подвижность элемента в секторах 1 и 2 для «насыпи» и «нулевого положения». Превышение кларка (6 мг/кг) отмечалось только в верхних горизонтах (0–10 см) «насыпи» секторов 1 и 2 в 1,3–1,5 раза. Результаты показывают слабый эффект накопления и средний захват кобальта компонентами почв.

Медь (Cu). Средние концентрации элемента колеблются в широких пределах – от 4,16 до 47,75 мг/кг. Превышение ПДК и ОДК (33 мг/кг) отмечалось в верхнем горизонте (0–10 см) сектора 1 «насыпи» в 1,4 раза (47,75 мг/кг) (см. рис. 2, табл. 2). Среднее содержание Cu в верхнем горизонте (0–10 см) было выше нижнего (10–20 см) в 1,6 раза – на 7,26 мг/кг. Для всех экспозиций отмечается снижение средней концентрации по мере удаления от дорожного полотна. Равномерное изменение концентрации Cu отмечается в положительной корреляции ($r = 0,9$ при $p < 0,05$) между секторами 1 и 2 «нулевого положения» и всей полосы отвода «выемки». «Насыпь» соответствует общему положению наибольшей загрязненности ТМ – средняя концентрация выше «нулевого положения» и «выемки» в 2,3 и 2 раза соответственно. Превышение кларкового значения (13 мг/кг) преимущественно отмечается в верхних горизонтах (0–10 см). Концентрация Cu показывает постоянное снижение в зависимости от удаления от дорожного полотна без характерной аккумуляции в кюветах.

Никель (Ni). Средние показатели содержания Ni находятся в пределах 7,87–18,98 мг/кг, превышений ПДК (85 мг/кг) и ОДК (20 мг/кг) не обнаружено (см. рис. 2, табл. 2). Средняя концентрация в верхнем горизонте (0–10 см) выше нижнего (10–20 см) в 1,3 раза – на 3,24 мг/кг. Положительная корреляция для секторов 1 и 2 «насыпи» ($r = 0,8$ при $p < 0,05$), всей полосы отвода «нулевого положения» и «выемки» ($r = 0,9$ при $p < 0,05$) характеризует равномерное распределение элемента вдоль всей полосы отвода с накоплением в кюветах и смывом с откосов. Значения концентрации Ni ниже кларка (20 мг/кг) показывают наименьшую загрязненность почвы по сравнению с другими ТМ.

Свинец (Pb). Диапазон средних значений Pb находится в пределах 10,11–25,96 мг/кг, превышений ПДК (32 мг/кг) и ОДК (30 мг/кг) не обнаружено (см. рис. 2, табл. 2). В отличие от других элементов концентрация свинца выше в нижнем горизонте (10–20 см) на 1,52 мг/кг, что, вероятно, вызвано ранее используемым этилированным бензином, остаточные продукты которого мигрировали в нижние горизонты. Исключением являются сектор 3 «нулевого положения» и сектор 4 «выемки» по причине высокой сельскохозяйственной освоенности региона, возможного использования фосфатных удобрений, содержащих Pb, на примыкающих к автодороге территориях. В «выемке» между секторами 2 и 3 отмечалась положительная корреляция ($r = 0,9$ при $p < 0,05$) по накоплению свинца. Наибольшая средняя загрязненность характерна для «насыпи» – в 1,2 раза выше «выемки» и в 1,5 раза выше «нулевого положения». Средняя концентрация Pb была выше кларковых значений (12 мг/кг) во всех экспозициях, кроме сектора 3 «нулевого положения» и нижнего горизонта (10–20 см) сектора 4 «выемки». Отмечается накопление в кювете «выемки» по сравнению с примыкающими секторами в 1,3–1,4 раза – на 4,49–5,39 мг/кг.

Цинк (Zn). Средние концентрации цинка колеблются в широких значениях – 10,97–299,34 мг/кг. Отмечено превышение допустимых концентраций: для «выемки» отмечалось превышение ОДК (55 мг/кг) в секторах 1 и 2, а также в верхнем горизонте (0–10 см) сектора 3 в среднем в 1,4 раза; в «нулевом положении» превышение ОДК было в верхнем горизонте (0–10 см) секторов 1 и 2 в 1,2 раза (см. рис. 2, табл. 2). В «насыпи» отмечены самые высокие показатели превышения ПДК (100,0 мг/кг) в секторе 1 (верхний горизонт (0–10 см) в 3 раза, нижний горизонт (10–20 см) в 1,4 раза) и секторе 2 (верхний горизонт (0–10 см) в 1,7 раза). Превышение ОДК также наблюдалось в секторе 3 в нижнем горизонте (10–20 см) в 1,5 раза и в верхнем горизонте (0–10 см) в 1,2 раза. В «нулевом положении» характерно накопление Zn в нижнем горизонте (10–20 см) кювета ($r = 0,9$ при $p < 0,05$) при росте концентрации в примыкающих секторах 1 и 3. В «выемке» положительная корреляция ($r = 0,9$ при $p < 0,05$) равномерного распределения Zn отмечается в секторах 2–4. Наибольшее содержание элемента в «насыпи»: выше

Таблица 2. Концентрация тяжелых металлов в почве придорожных территорий, мг/кг

Элемент / показатель (глубина, см)	Экспозиция «выемка», мг/кг						Экспозиция «насыпь», мг/кг						Экспозиция «нулевое положение», мг/кг		
	Сектор						Сектор						Сектор		
	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)	4 (10 м)	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)		
Cd (0–10)	0,16 ± 0,012	0,19 ± 0,019	0,16 ± 0,030	0,14 ± 0,005	0,34 ± 0,078	0,25 ± 0,036	0,21 ± 0,031	0,15 ± 0,007	0,17 ± 0,009	0,14 ± 0,017	0,15 ± 0,007	0,17 ± 0,009	0,14 ± 0,017		
Cd (10–20)	0,14 ± 0,014	0,16 ± 0,011	0,15 ± 0,029	0,10 ± 0,026	0,32 ± 0,078	0,21 ± 0,037	0,20 ± 0,030	0,13 ± 0,001	0,15 ± 0,007	0,10 ± 0,014	0,13 ± 0,001	0,15 ± 0,007	0,10 ± 0,014		
Co (0–10)	2,84 ± 0,027	3,38 ± 0,031	3,27 ± 0,047	3,58 ± 0,033	7,59 ± 0,466	6,69 ± 0,562	5,75 ± 0,225	4,36 ± 0,595	4,71 ± 0,961	2,24 ± 0,024	4,36 ± 0,595	4,71 ± 0,961	2,24 ± 0,024		
Co (10–20)	4,36 ± 1,171	5,00 ± 1,241	4,71 ± 1,107	4,73 ± 0,889	4,55 ± 0,344	4,80 ± 0,065	4,26 ± 0,281	3,40 ± 0,622	3,80 ± 0,715	3,12 ± 0,672	3,40 ± 0,622	3,80 ± 0,715	3,12 ± 0,672		
Cu (0–10)	16,37 ± 4,221	16,90 ± 6,436	16,06 ± 8,351	7,57 ± 1,738	47,75 ± 7,404	25,33 ± 4,958	18,58 ± 5,336	23,21 ± 4,143	9,89 ± 1,147	8,14 ± 2,533	23,21 ± 4,143	9,89 ± 1,147	8,14 ± 2,533		
Cu (10–20)	13,33 ± 3,358	12,83 ± 4,471	8,90 ± 4,034	5,10 ± 2,565	25,79 ± 3,010	16,93 ± 5,493	11,52 ± 2,629	10,51 ± 3,454	8,11 ± 0,983	4,16 ± 1,101	10,51 ± 3,454	8,11 ± 0,983	4,16 ± 1,101		
Ni (0–10)	11,22 ± 1,117	15,16 ± 3,557	12,74 ± 3,952	13,62 ± 4,506	18,98 ± 1,854	15,91 ± 0,976	15,37 ± 1,269	12,77 ± 1,645	11,75 ± 1,739	9,93 ± 0,673	12,77 ± 1,645	11,75 ± 1,739	9,93 ± 0,673		
Ni (10–20)	11,03 ± 1,483	13,44 ± 3,820	9,38 ± 1,974	9,70 ± 4,199	12,61 ± 0,689	7,87 ± 1,422	12,18 ± 0,582	9,58 ± 1,187	11,12 ± 1,442	8,19 ± 1,143	9,58 ± 1,187	11,12 ± 1,442	8,19 ± 1,143		
Pb (0–10)	14,59 ± 0,229	20,02 ± 1,650	16,33 ± 2,086	14,89 ± 0,312	19,94 ± 2,417	16,03 ± 1,275	15,37 ± 1,446	15,29 ± 1,321	15,07 ± 0,139	10,11 ± 1,276	15,29 ± 1,321	15,07 ± 0,139	10,11 ± 1,276		
Pb (10–20)	15,67 ± 2,681	21,02 ± 2,076	15,86 ± 2,483	11,28 ± 3,083	23,88 ± 1,531	25,96 ± 7,063	18,19 ± 2,235	14,91 ± 1,478	15,61 ± 0,439	10,43 ± 1,201	14,91 ± 1,478	15,61 ± 0,439	10,43 ± 1,201		
Zn (0–10)	88,93 ± 20,588	91,09 ± 36,420	82,22 ± 43,067	34,68 ± 8,103	299,34 ± 29,066	165,15 ± 29,160	64,44 ± 23,864	76,75 ± 17,657	57,50 ± 18,560	42,35 ± 14,250	76,75 ± 17,657	57,50 ± 18,560	42,35 ± 14,250		
Zn (10–20)	60,72 ± 18,633	74,92 ± 24,135	43,11 ± 20,696	22,02 ± 8,148	138,09 ± 30,539	82,49 ± 10,500	38,09 ± 7,814	47,16 ± 18,669	40,45 ± 8,845	10,97 ± 2,933	47,16 ± 18,669	40,45 ± 8,845	10,97 ± 2,933		
Z _c (0–10)	7,8	9	7,5	2,6	30,9	16,4	6,9	7,3	4,9	2,4	7,3	4,9	2,4		
Z _c (10–20)	5	7,1	3,1	0,2	15	8,7	3,9	3,3	3	-1,1	3,3	3	-1,1		

«нулевого положения» в 2,9 раза и «выемки» в 1,8 раза. Среднее содержание цинка в секторах экспозиций превышало кларки (35 мг/кг), кроме нижнего горизонта (10–20 см) наиболее отдаленных секторов «выемки» и «нулевого положения». Наиболее высокие концентрации Zn в отличие от других элементов, вероятно, вызваны внесением минеральных удобрений (сульфат аммония с высоким содержанием цинка) на примыкающих территориях и сходны с антропогенным воздействием Pb.

Для каждого сектора экспозиций (с учетом отбора почвы на глубине 0–10 и 10–20 см) был рассчитан суммарный показатель загрязнения (Z_c) (см. табл. 2). Определение среднего значения для всех показателей Z_c в пределах экспозиции показало следующие различия по уровню загрязненности ТМ: «насыпь» (13,6 – низкий) > «выемка» (5,3 – допустимый) > «нулевое положение» (3,3 – допустимый). Общий уровень загрязненности «насыпи» был выше «выемки» в 2,6 раза и выше «нулевого положения» в 4,1 раза.

Наибольший суммарный показатель загрязнения (Z_c) отмечен в секторе 1 «насыпи»: верхний горизонт (0–10 см) – 30,9 (средний уровень загрязнения), нижний горизонт (10–20 см) – 15,0 (низкий уровень загрязнения) и секторе 2 (верхний горизонт (0–10 см) – 16,4 (средний уровень загрязнения), нижний горизонт (10–20 см) – 8,7 (низкий уровень загрязнения) (см. табл. 2). В верхнем горизонте (0–10 см) сектора 2 «выемки» $Z_c = 9,0$ (низкий уровень загрязнения). В остальных секторах экспозиций $Z_c = -1,1-7,8$ (допустимое загрязнение) со снижением по мере удаления от дорожного полотна и глубины анализа почв. Наибольшее значение Z_c среди всех изученных ТМ имеет Zn: наблюдается его антропогенный рост вследствие увеличения автотранспортного потока и широкого использования минеральных удобрений в сельском хозяйстве на примыкающих к автодороге территориях.

Структура придорожных фитоценозов. По синтаксономической структуре придорожная растительность представлена 3 классами, 4 порядками, 6 союзами, 11 ассоциациями и 2 сообществами.

ПРОДРОМУС ПРИДОРОЖНОЙ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Класс *Polygono-Poetea annuae* Rivas-Martínez 1975

Порядок *Polygono arenastr-Poëtalía annuae* R. Tx. in Géhu et al. 1972 corr. Rivas-Martínez et al. 1991

Союз *Polygono-Coronopodion* Sissingh 1969

Акк. *Polygonetum arenastr* Gams 1927 corr. Lanikova in Chytry 2009

Класс *Artemisietea vulgaris* Lohmeyer et al. in Tx. ex von Rochow 1951

Порядок *Agropyretalia intermedio-repentis* T. Müller et Görs 1969

Союз *Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis* Görs 1967

Акк. *Arrhenathero elatioris-Dactylidetum glomeratae* Arepieva 2015

Акк. *Convolvulo arvensis-Elytrigietum repentis* Felföldy 1943

Акк. *Convolvulo arvensis-Brometum inermis* Felföldy 1943

Акк. *Calamagrostidetum epigeios* Kostiljov in V. Solomakha et al. 1992

Сообщество *Calamagrostis epigeios* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Coryneporetea canescentis*]

Сообщество *Pilosella officinarum-Bromopsis inermis* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Coryneporetea canescentis*]

Класс *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937

Порядок *Potentillo-Polygonetalia avicularis* Tx. 1947

Союз *Potentillion anserinae* Tx. 1947

Акк. *Lolio-Potentilletum anserinae* (Knapp 1946) Tx. 1947

Порядок *Arrhenatheretalia* R. Tx. 1931

Союз *Arrhenatherion elatioris* (Br.-Bl. 1925) Koch 1926

Акк. *Festucetum rubrae* (Domin 1923) Válek 1956 em. Pukau et al. 1956

Союз *Festucion pratensis* Sipajlova et al. 1985

Акк. *Dactylido glomeratae-Bromopsietum inermis* Sapegin et Dajneko 2008

Акк. *Festucetum pratensis-Dactylidetum glomeratae* Dymina 1989

Союз *Cynosurion cristati* Tx. 1947

Акк. *Leontodonto-Poetum pratensis* Anishchenko et Ishbirdina in Ishbirdina et al. 1989 ex Anishchenko et al. 2019

Акк. *Lolietum perennis* Gams 1927

Классы *Polygono-Poetea annuae* и *Artemisietea vulgaris* представлены в основном растительностью нарушенных территорий (рудерально-сегетальные виды) и соответствуют наиболее загрязненным секторам полосы отвода, что также связано с высоким уровнем общего антропогенного воздействия, сопровождающегося деградацией почвенного покрова [21, 22].

Асс. *Polygonetum arenastri* Gams характерна для сектора 1 всех экспозиций и встречается в условиях $Z_c = 3,3-30,9$ (допустимый средний уровень загрязнения) (см. табл. 2). Сообщество характерно для участков полосы отвода с сильным уплотнением и перегревом почв, высокой степенью эрозии [22]. Основу сообщества формируют такие виды, как *Poa annua*, *Polygonum arenastrum*, *Potentilla anserina*, *Plantago major*, *Poa compressa* и др.

Асс. *Arrhenathero elatioris-Dactylidetum glomeratae* встречается исключительно в секторах 2 и 3 «насыпи» и соответствует участкам со слабым антропогенным воздействием без признаков вытаптывания и уплотнения почв, отсутствием механического повреждения почвенного покрова в результате кошения [23]. Уровень $Z_c = 3,9-16,4$ (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Доминируют следующие виды: *Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium pratense*, *Festuca pratensis*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Convolvulo arvensis-Elytrigietum repentis* и асс. *Convolvulo arvensis-Brometum inermis* отмечены в секторах 1 и 2 участков, фитоценозы достаточно сформированы, антропогенная нагрузка умеренная с признаками эрозии почв [24]. $Z_c = 3-30,9$ (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Преобладают такие виды, как *Bromopsis inermis*, *Convolvulus arvensis*, *Dactylis glomerata*, *Elytrigia repens*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Calamagrostidetum epigeios* отличается широкой экологической валентностью условий произрастания, вдоль автодорог занимает территории, которые ранее испытали сильное антропогенное воздействие (реконструкция автодороги, регулярная периодичность сезонного кошения и высокая степень эрозии почв) или интенсивность данного воздействия на протяжении нескольких сезонов возросла [25]. Встречается во всех секторах экспозиций. Условия $Z_c = 0,2-30,9$ (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Характерные виды: *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Solidago Canadensis* и др.

Безранговые сообщества *Calamagrostis epigeios* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*] и *Pilosella officinarum-Bromopsis inermis* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*] отмечаются на откосах (сектор 3) «выемок» на участках с наибольшей эрозией почв и деградацией придорожного газона вследствие интенсивного кошения. $Z_c = 3,1-7,5$ (допустимый уровень загрязнения ТМ) – отсутствие сформированного газона (фитоценоз с замкнутой ценофлорой) в первую очередь определяется методами ухода, а не уровнем загрязненности почв ТМ (см. табл. 2). Доминируют виды *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Coryza canadensis*, *Lolium perenne*, *Pilosella officinarum* и др.

Сообщества класса *Molinio-Arrhenatheretea* отражают наиболее благоприятные условия развития придорожных фитоценозов, приближенных к параметрам регламентируемого придорожного газона. Почвенный покров подвержен меньшей интенсивности общего антропогенного воздействия в отличие от классов *Polygono-Poetea annuae* и *Artemisietea vulgaris* [26].

Асс. *Lolio-Potentilletum anserinae* и асс. *Lolietum perennis* встречаются на участках с наибольшей загрязненностью почв ТМ, для которых характерны сильное антропогенное воздействие, эрозия, уплотнение и механическое повреждение почв и растительности в результате частого кошения (сектор 1 всех экспозиций) [27, 28]. Условия $Z_c = 3,3-30,9$ (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). В основе фитоценоза виды *Dactylis glomerata*, *Festuca rubra*, *Leontodon autumnalis*, *Lolium perenne*, *Potentilla anserina* и др.

Асс. *Festucetum rubrae* встречается вдоль всей полосы отвода экспозиций на участках с плотной, достаточно сформированной дерниной, соответствует параметрам придорожного газона [29]. $Z_c = 0,2-30,9$ (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). В сообществах преобладают виды *Bromopsis inermis*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Dactylido glomeratae-Bromopsietum inermis* является наиболее распространенной вдоль автодорог Минска и Минской обл. и динамичной, но в отличие от сообществ сеяных пойменных лугов богата синантропными видами [30]. Занимает все сектора экспозиций полосы отвода, кроме сектора 1. Условия $Z_c = 0,2-16,4$ (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Доминируют виды *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Solidago canadensis* и др.

Асс. *Festucetum pratensis-Dactylidetum glomeratae* встречается преимущественно в секторе 3 «насыпи» и «нулевого положения», секторе 4 «выемки». В сообществе отмечается обилие луговых и синантропных видов. Интенсивность эрозии почв одна из самых низких. $Z_c = 0,2-6,9$ (допустимый уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Преобладают виды *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis* и др.

Асс. *Leontodonto-Poetum pratensis* также характерна для наиболее отдаленных от дорожного полотна секторов, но испытывающих сильное антропогенное воздействие (вытаптывание) из-за частого призывания к пешеходным дорожкам и другой придорожной инфраструктуре [28]. Условия $Z_c = 0,2-16,4$

(допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Доминируют виды: *Dactylis glomerata*, *Leontodon autumnalis*, *Poa pratensis* и др.

Рекомендации по подбору видов, используемых для формирования придорожного газона в условиях антропогенных факторов вдоль автодорог. Учитывая доминирование видов в отмеченных сообществах, специфику антропогенного воздействия и уровень загрязненности почв ТМ, следует предложить следующие виды злаков для озеленения придорожных территорий: длиннокорневищные (*Bromopsis inermis*, *Elytrigia repens*) и рыхлодерновинные (*Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis*). На участках с наиболее выраженными эрозионными процессами предлагается дополнительно использовать *Calamagrostis epigeios*. Из существующих придорожных травосмесей следует исключить *Phleum pratense* и *Agrostis tenuis* из-за их низкой встречаемости в условиях антропогенного воздействия, в том числе вероятностного токсического эффекта от загрязнения ТМ.

Закключение. Условия антропогенного воздействия вдоль автодорог обусловили преимущественное загрязнение ТМ верхнего горизонта (0–10 см) с накоплением ряда элементов (Cd, Co, Ni, Pb) в кюветах. Pb показал более высокие концентрации в нижнем горизонте (10–20 см) – последствия использования этилированного бензина в конце XX в. По результатам сравнения с санитарно-гигиеническими нормативами (ПДК и ОДК) отмечается наибольшая загрязненность полосы отвода Co, Cu, Zn; Cd, Ni, Pb, не превышавшими допустимые концентрации. Концентрация Ni не превышала кларковых значений, что характеризует его наименьшее содержание по сравнению с другими элементами. Аномальное содержание Zn определяется ростом автотранспорта и используемых минеральных удобрений на примыкающих к автодороге участках. Суммарный показатель загрязнения определил наибольшее накопление элементов в «насыпи» и наименьшее загрязнение почв в «нулевом положении». Наибольшее значение в Z_c имеет Zn. Полученные данные загрязненности полосы отвода ТМ и определение структуры придорожных сообществ с оценкой вклада основных доминирующих видов позволили предложить список растений для озеленения, обладающих устойчивостью к комплексу негативных факторов (эрозия, кошение, загрязнение ТМ и др.).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант НАУКА М № Б23М-001 от 2 мая 2023 г.).

Список использованных источников

1. Сумина, О. И. Формирование растительности на техногенных местообитаниях Крайнего Севера России / О. И. Сумина. – СПб.: Информ–Навигатор, 2013. – 340 с.
2. Харитонцев, Б. С. Особенности видового состава растительности придорожных фитоценозов / Б. С. Харитонцев, Е. И. Попова // Современ. проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – С. 1–8.
3. Узаков, З. З. Тяжелые металлы и их влияние на растения / З. З. Узаков // Символ науки. – 2018. – № 1–2. – С. 52–53.
4. Давыдова, С. Л. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века: учеб. пособие / С. Л. Давыдова, В. И. Тагасов. – М.: Изд-во РУДН, 2002. – 140 с.
5. Сообщества растений трансформеров: ассоциация *Urtico dioicae-Heracleetum sosnowskyi* / Н. Н. Панасенко [и др.] // Бюл. Брянск. отд-ния Рус. ботан. о-ва. – 2014. – Т. 2, № 5. – С. 48–53.
6. Косицин, А. В. Внутривидовая изменчивость металлоустойчивости в некоторых южноуральских популяциях *Aster alpinus* (Asteraceae) / А. В. Косицин, Н. В. Алексеева-Попова, Т. И. Игошина // Ботан. журн. – 1985. – Т. 70, № 8. – С. 1084–1091.
7. Демич, Ю. А. Содержание тяжелых металлов в объектах окружающей среды и состояние растительных популяций / Ю. А. Демич // Вестн. СГУ. – 2006. – № 7 (47). – С. 45–53.
8. Содержание токсических веществ в листьях деревьев – экологическая характеристика урбосистемы / А. П. Парахонский [и др.] // Междунар. журн. эксперим. образования. – 2011. – № 3. – С. 110–111.
9. Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности: Закон Респ. Беларусь, 2 дек. 1994 г., № 3434-XII // Ведомасці Нац. сходу Рэсп. Беларусь. – 1995. – № 5. – 31 с.
10. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: ГОСТ 17.4.4.022017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.
11. Загрязнение почвогрунта полосы отвода автомобильных дорог Минской области тяжелыми металлами / Е. С. Шавалда [и др.] // Ботаника (исследования). – 2023. – Вып. 52. – С. 155–166.
12. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск: РУП «Ин-т почвоведения и агрохимии», 2002. – 239 с.
13. Об утверждении гигиенических нормативов [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г., № 37 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://rpsch.by/Docs/post-37-2021.pdf>. – Дата доступа: 15.03.2024.
14. Петухова, Н. Н. Кларкам микроэлементов в почвенном покрове Беларуси / Н. Н. Петухова, В. А. Кузнецов // Докл. Акад. наук Беларуси. – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 461–465.
15. Охрана окружающей среды и природопользование Земли. Порядок выполнения работ по дифференцированному нормированию содержания химических веществ в землях (включая почвы) = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне Зямлі. Парадак выканання работ па дыферэнцыяванаму нармаванню ўтрымання хімічных рэчываў у землях (уключаючы глебы): ТКП 17.03-06-2019 (33140). – Введ. 01.05.19. – Минск: М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды. – 2019. – 17 с.

16. Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. 2014 г. / НАН Беларуси, М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды; под общ. ред. В. Ф. Логинова. – Минск: [б. и.], 2015. – 347 с.
17. Павлов, П. Д. Состояние почвенного покрова в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов (на примере Александровского полигона г. Саратова) / П. Д. Павлов, М. В. Решетников, В. Н. Еремин // Аграр. науч. журн. – 2014. – № 11. – С. 34–38.
18. Баканина, Ф. М. Техногенные изменения почвенного покрова городских территорий (на примере г. Горького) / Ф. М. Баканина // Антропогенные изменения и охрана природной среды: межвуз. сб. науч. тр. / М-во образования РСФСР, Нижегород. гос. пед. ин-т; редкол.: Э. Г. Коломыц [и др.]. – Н. Новгород, 1990. – С. 61–66.
19. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Минск: Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
20. Миркин, Б. М. История и концептуальные установки классификации растительных сообществ с использованием подхода Браун–Бланке / Б. М. Миркин, Л. Г. Наумова // *Lethaea rossica*. – 2014. – Т. 9. – С. 21–34.
21. Vegetation of the Czech Republic 2. Ruderal, weed, rock and scree vegetation Academia / М. Chytrý [et al.]. – Praha, 2009. – 520 p.
22. Обзор растительных сообществ класса *Polygono arenastri–Poëtea annuae* в Российской Федерации / Я. М. Голованов [и др.] // *Turczaninowia*. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 147–169.
23. Арепьева, Л. А. Синантропные сообщества с *Dactylis glomerata* L. в Курской области / Л. А. Арепьева // Растительность России. – 2018. – № 33. – С. 3–18.
24. Арепьева, Л. А. О новых синтаксонах синантропной растительности города Брянска / Л. А. Арепьева // Разнообразие растительного мира. – 2019. – № 2 (2). – С. 18–37.
25. Бородулина, В. П. Наземнейниковые луга в охранной зоне Полистовского заповедника (Псковская область) / В. П. Бородулина, А. Ф. Комарова, О. В. Чередниченко // Разнообразие растительного мира. – 2019. – № 1 (1). – С. 44–61.
26. Vegetation of the Czech Republic 1. Grassland and Heathland Vegetation / М. Chytrý [et al.]. – Praha, 2007. – 528 p.
27. *Vodrogköz*, Gy. Hydroecology of the plant communities at the middle Tisza-valley i. *Agropyro-Rumicion* / Gy. Bodrogköz // *Tiscia (Szeged)*. – 1985. – Vol. 20. – P. 55–97.
28. Растительность газонов города Уфы (Республика Башкортостан) / И. Е. Анищенко [и др.] // Растительность России. – 2019. – № 36. – С. 25–40.
29. Автомобильные дороги. Правила содержания: ТКП 366-2021 (33200). – Минск: М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 2022. – 41 с.
30. Сапегин, Л. М. Синтаксономия и геоботаническая характеристика луговых экосистем поймы р. Сож пригорода г. Гомеля / Л. М. Сапегин, Н. М. Дайнеко // Изв. Гомел. гос. ун-та имени Ф. Скорины. – 2010. – № 3 (60). – С. 29–39.

Поступила 02.05.2024

ПОЧВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ**SOIL AND LAND RESOURCES****ГЛЕБАВА-ЗЕМЕЛЬНЫЯ РЭСУРСЫ**

ISSN 1810-9810 (Print)

УДК 574.2:502.22-022.233

**А. И. Чайковский¹, М. В. Максименков¹, М. В. Кудин², И. А. Богданович¹, С. С. Терещенко¹,
И. Ю. Гигиняк¹, Д. В. Журавлёв¹**

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
Минск, Беларусь,
e-mail: chai-kovski@tut.by

²Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, Хойники, Беларусь,
e-mail: max.kudin@mail.ru

**К ОПЫТУ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ
НАРУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ В ПОЛЕССКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМ ЗАПОВЕДНИКЕ**

Аннотация. На основании разработанного научного обоснования экологической реабилитации нарушенных торфяников на проектной территории «Погонянское-2», расположенной в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области, в соответствии со строительным проектом на каналах осушительной сети возведен каскад из 20 глухих земляных перемычек и 2 переливных каменно-набросных перемычек на р. Несвиж с перепадом уровней воды между ними около 0,3 м. Для предотвращения выноса радионуклидов с загрязненной территории, их аккумуляции и консервации в донных отложениях на участке русла р. Несвиж устроен илонакопитель протяженностью около 700 м. Выполненные мероприятия по экологической реабилитации нарушенных торфяников на проектной территории «Погонянское-2» создают условия не только для восстановления биосферных функций болот, но и обеспечивают снижение вероятности возникновения торфяных и лесных пожаров, гибели лесной и болотной растительности, предотвращают залповые выбросы углекислого газа и минимизируют вынос радионуклидов на сопредельные территории. Работы выполнены в рамках реализации НИОКТР «Повторное заболачивание загрязненных радионуклидами и выведенных из использования осушенных торфяников для предотвращения торфяных пожаров и сохранения биоразнообразия» Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы.

Ключевые слова: торфяники, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, экологическая реабилитация нарушенных болот, повторное заболачивание, радионуклиды

**A. I. Chaikouski¹, M. V. Maksimenkov¹, M. V. Kudin², I. A. Bogdanovich¹, S. S. Tereshchenko¹,
I. Yu. Giginyak¹, D. V. Zhuravlev¹**

¹Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Belarus,
e-mail: chai-kovski@tut.by

²Polesie State Radiation-Ecological Reserve, Khoyniki, Belarus, e-mail: max.kudin@mail.ru

**ON THE EXPERIENCE OF ECOLOGICAL REHABILITATION OF DISTURBED PEATLANDS
IN THE POLESIE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE**

Abstract. On the basis of the developed scientific substantiation of the ecological rehabilitation of disturbed peatlands in the "Pogonyanskoye-2" project area located in the Khoyniki and Bragin districts of the Gomel region, according to the construction project, a cascade of 20 blind earthen cofferdams and 2 overflow rock-fill cofferdams was constructed on the drainage network channels on the Nesvich River with the water level difference between them of about 0.3 m. In order to prevent radionuclides from leaving the contaminated area, and their accumulation and retention in the bottom sediments in the section of the river bed, a sludge pond with the length of about 700 m was constructed in Nesvich. The completed measures for the environmental rehabilitation of disturbed peatlands in the "Pogonyanskoye-2" project area not only create conditions for restoring the biosphere functions of the peatlands, but also reduce the likelihood of peat and forest fires, the death of forest and peatland vegetation, prevent the salvo emission of carbon dioxide, and minimize the transfer of radionuclides to adjacent territories. The work was carried out as part of the implementation of the R&D project "Rewetting of drained and withdrawn from use peatlands contaminated with radionuclides for prevention of peat fires and preservation of biodiversity" of the State Program for Overcoming the Consequences of the Chernobyl Disaster for 2021–2025.

Key words: peatlands, Polesie State Radioecological Reserve, environmental rehabilitation of disturbed peatlands, rewetting, radionuclides

А. І. Чайкоўскі¹, М. В. Максіменкаў¹, М. В. Кудзін², І. А. Багдановіч¹, С. С. Цярэшчанка¹, І. Ю. Гігняк¹, Д. В. Жураўлёў¹

¹Навукова-практычны цэнтр Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па біярэсурсах, Мінск, Беларусь,
e-mail: chaikovski@tut.by

²Палескі дзяржаўны радыяцыйна-экалагічны запаведнік, Хойнікі, Беларусь,
e-mail: max.kudin@mail.ru

ДА ВОПЫТУ ПРАВЯДЗЕННЯ ЭКАЛАГІчнай РЭАБІліТАцыі ПАРУШАНЫХ ТАРФЯНІКАЎ У ПАЛЕСКІМ ДЗЯРЖАЎНЫМ РАДЫЯЦЫЙНА-ЭКАЛАГІчным ЗАПАВЕДНІКУ

Анотацыя. На аснове распрацаванага навуковага абгрунтавання экалагічнай рэабілітацыі парушаных тарфянікаў на праектнай тэрыторыі «Паганянскае-2», размешчанай у Хойніцкім і Брагінскім раёнах Гомельскай вобласці, у адпаведнасці з будаўнічым праектам на каналах асушальнай сеткі ўзведзены каскад з 20 глухіх земляных перамычак і 2 пераліўных каменна-накідных перамычак на р. Нясвіч з перападам узроўняў вады паміж імі каля 0,3 м. Для прадухілення вынасу радыенуклідаў з забруджанай тэрыторыі, іх акумуляцыі і кансервацыі ў донных адкладах на ўчастку рэчышча р. Нясвіч уладкаваны іланазапашвальнік працягласцю каля 700 м. Выкананыя мерапрыемствы па экалагічнай рэабілітацыі парушаных тарфянікаў на праектнай тэрыторыі «Паганянскае-2» ствараюць умовы не толькі для аднаўлення біясферных функцый балот, але і забяспечваюць зніжэнне верагоднасці ўзнікнення тарфяных і лясных пажараў, гібелі лясной і балотнай расліннасці прадухіляюць залпавыя выкіды вуглякіслага газу і мінімізуюць вынас радыенуклідаў на сумежныя тэрыторыі. Работы выкананы ў рамках рэалізацыі НДДКТР «Паўторнае забалочванне забруджаных радыенуклідамі і выведзеных з выкарыстання асушаных тарфянікаў для прадухілення тарфяных пажараў і захавання біязнастайнасці» Дзяржаўнай праграмы па пераадоленню наступстваў катастрофы на Чарнобыльскай АЭС на 2021–2025 гады.

Ключавыя словы: тарфянікі, Палескі дзяржаўны радыяцыйна-экалагічны запаведнік, экалагічная рэабілітацыя парушаных балот, паўторнае забалочванне, радыенукліды

Введение. Болота играют исключительно важную роль в обеспечении устойчивости биосферы. Одной из основных их функций является регулирование и поддержание благоприятного регионального гидрологического режима для устойчивого функционирования естественных экологических систем и обеспечения сохранения водных ресурсов за счет накопления в болотах запасов пресной воды (более 7 млрд м³), обеспечения водного питания рек и озер. Сохранившиеся в Республике Беларусь в естественном состоянии болота (863 тыс. га) выполняют газорегуляторную функцию – ежегодно выводят из атмосферы около 900 тыс. т диоксида углерода и выделяют в атмосферу 630 тыс. т кислорода [1]. В болотах Республики Беларусь накоплено и сохраняется около 500 млн т углерода.

Вместе с тем в связи с увеличением антропогенной нагрузки на естественные болотные экологические системы и нерациональным использованием отдельных участков осушенных земель на торфяных почвах отмечаются процессы их деградации. К наиболее значимым проблемам, возникающим в таких ситуациях, относятся минерализация торфа, выделение парниковых газов в атмосферу и торфяные пожары.

Восстановление нарушенных болот – особо актуальный вопрос для Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ), территория которого характеризуется максимальными плотностями поверхностного радиоактивного загрязнения почвы долгоживущими радионуклидами, включая трансурановые элементы, которые могут переноситься паводковыми водами и воздушными потоками при возникновении торфяных пожаров.

В этой связи в 2023 г. в соответствии с НИОКТР «Повторное заболачивание загрязненных радионуклидами и выведенных из использования осушенных торфяников для предотвращения торфяных пожаров и сохранения биоразнообразия» Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 гг. проводились исследования по экологической реабилитации нарушенных торфяников на проектной территории «Погонянское-2», расположенной в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области на общей площади 5 946,2 га.

На начальном этапе выполнения научной работы была осуществлена инвентаризация торфяников, расположенных в ПГРЭЗ, и оценено их современное состояние. В ходе анализа научных и ведомственных материалов первичного учета, выполненных полевых исследований установлено, что в границы заповедника входят 24 торфяника суммарной площадью 33 093 га, из которых только два находились в естественном состоянии. Основываясь на полученных сведениях, авторским коллективом был определен участок торфяников, нуждающийся в проведении экологической реабилитации в первоочередном порядке, с условным названием «проектная территория «Погонянское-2»». Он включал в себя юго-восточную часть торфяника «Погонянское» (5 680 га) и западную часть торфяника «Колыбанское» (266,2 га). Оба торфяника полностью расположены в границах ПГРЭЗ.

Торфяник «Погонянское» (кадастровый № 1436) площадью 13 908 га расположен в Брагинском (1 650 га) и Хойникском (12 258 га) районах в центральной части ПГРЭЗ. Средняя глубина торфяной залежи составляет 2,1 м, запасы торфа – 22 729 тыс. т согласно схеме распределения торфяников на период до 2030 г [2]. Торфяник низинного типа, степень разложения – 33 %, зольность – 14,9 %.

Торфяник «Колыбанское» (кадастровый № 1447) площадью 832 га находится в Брагинском районе в юго-восточной части ПГРЭЗ. Средняя глубина торфяной залежи – 1,3 м, запасы торфа – 934 тыс. т. Торфяник низинного типа, степень разложения – 36 %, зольность – 12,2 %.

В 80-е гг. XX в. эти торфяники были осушены открытой гидромелиоративной сетью и использовались на протяжении 10–15 лет в сельскохозяйственных целях (выпас скота, выращивание многолетних трав и пропашных культур). На отдельных участках торфяников начиная с 1960–1970-х гг. велась добыча торфа. После завершения торфодобычи выработанные торфяники частично использовались для сельскохозяйственных нужд или без рекультивации были переданы в лесной фонд. После аварии на Чернобыльской АЭС рассматриваемая территория вошла в зону эвакуации (отчуждения). Сельскохозяйственная деятельность здесь была прекращена, уход за гидротехническими сооружениями и мелиоративной сетью перестал осуществляться, однако осушительная сеть продолжила дренировать торфяники. В настоящее время процессы естественного заболачивания идут медленными темпами, на значительной части проектной территории продолжает доминировать сорно-рудеральная растительность со значительным участием инвазивных видов – череды облиственной *Bidens frondosa* и эхиноцистиса шиповатого *Echinocystis lobata*.

Выбор проектной территории «Погонянок-2» в качестве первоначального объекта заболачивания определялся следующими причинами.

Во-первых, нестабильным в последние годы низким уровнем стояния болотных вод (УСБВ), препятствующим восстановлению биосферных функций болот и процессов торфообразования. Данный негативный фактор, воздействующий на болотную экосистему, связан как с дренирующей деятельностью каналов осушительной сети, так и с климатическими изменениями в регионе, отмеченными в последние десятилетия. Материалы гидрологического мониторинга, полученные в 2023 г. с помощью автономных датчиков измерения уровня грунтовых вод «ДРУИД», свидетельствуют о значительных колебаниях УСБВ на болоте, составивших в течение года более 1,2 м. Максимальное снижение УСБВ отмечено в последней декаде сентября: –103 см от поверхности почвы. Следует отметить, что выпадение двойной нормы осадков в осенние месяцы (октябрь – ноябрь) не привело к восстановлению УСБВ до показателей, наблюдавшихся перед началом летней засухи (конец июля – начало августа), то есть сезонная динамика уровней воды в границах проектной территории определялась в основном динамикой поступления воды на объект заболачивания по подводящим каналам, и в первую очередь по Погонянскому каналу.

Во-вторых, необходимостью предотвращения выноса радионуклидов по каналам осушительной сети из ПГРЭЗ в р. Несвич и далее по ней в р. Припять.

Оценка радиозоологического состояния показала, что плотность загрязнения в границах проектного объекта ^{137}Cs варьирует в пределах 3,6–237,5 Ки/км². При этом 63 % (3 590,7 га) территории имеет уровень загрязнения более 40 Ки/км². Площадь от 5 до 15 Ки/км² составляет 16,8 % (958,8 га), 15–40 Ки/км² – 19,9 % (1 130,2 га). Наиболее загрязнены центральная и юго-восточная части торфяника, за исключением небольшого участка на самом юге.

В рамках проекта заложена локальная сеть радиационного мониторинга проектной территории и проведен сбор первичных данных по ^{137}Cs до начала строительных работ в части радиоактивного загрязнения почвы, донных отложений и поверхностных вод. Установлено, что плотность радиоактивного загрязнения донных отложений на различных участках водотоков колебалась в пределах от 72 до 3 848 кБк/м², при этом максимальная плотность отмечена на участках каналов с замедленным течением и слабо промываемых в период паводков (Погонянский канал у отселенной д. Погонное, Радинский канал у отселенной д. Радин). Содержание ^{137}Cs в воде варьировало в пределах 23 ± 6 Бк/л по ^{137}Cs . Наибольший уровень радиоактивного загрязнения почвы (торф) ^{137}Cs был зафиксирован в центральной части проектной территории и составил 13 947 Бк/кг (окрестности отселенной д. Радин), наименьший – 2 443 Бк/кг в пункте мониторинга, расположенном в районе отселенной д. Кулажин.

Плотность радиоактивного загрязнения проектной территории ^{90}Sr колеблется в пределах 0,4–12,7 Ки/км² и в среднем была значительно ниже, чем ^{137}Cs . Площадь с загрязнением свыше 3 Ки/км² составляет 76,6 % (4 348,1 га), 2–3 Ки/км² – 16,2 % (917,5 га), от 0,5 до 2 Ки/км² – 7,1 % (402 га) и менее 0,5 Ки/км² – 0,1 % (7,1 га). Наиболее высокие показатели, как и в случае ^{137}Cs , зафиксированы в центральной части торфяника.

В отношении ^{241}Am наблюдается равномерная картина его распределения по площади проектного объекта. Почти вся территория (99 %) имеет уровень радиоактивного загрязнения этим радионуклидом более 0,1 Ки/км². Минимальное зафиксированное значение плотности загрязнения составляет 0,07 Ки/км², а максимальное – 0,88 Ки/км².

Анализ данных по загрязнению почв объекта изотопами плутония показал, что его распределение по территории очень сходно с ^{137}Cs . Минимум и максимум плотности загрязнения составляет 0,006 и 0,46 Ки/км² соответственно. При этом 69 % (3 960,5 га) площади имеет плотность загрязнения свыше 0,1 Ки/км², а на остальной территории (31 %, или 1 714,2 га) этот показатель не превышает 0,1 Ки/км².

В-третьих, высокой пожарной опасностью данного торфяника: после прекращения хозяйственного использования здесь ежегодно накапливается значительный объем отпада растительной биомассы

(тростник, кустарники, болотные травы), что во многом повышает опасность возникновения пожаров и связанных с ними залповых выбросов диоксида углерода и радионуклидов. Вероятность возникновения пожаров, в том числе и торфяных, увеличивается в связи со снижением УСБВ на торфянике.

В-четвертых, повторным заболачиванием данных торфяников, что предусмотрено постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 17 сентября 2020 г. № 18 «Об установлении перечней болот и торфяников» (участки проектной территории – торфяники «Погонянское-3», «Погонянское-5» и «Колыбанское» вошли в перечень торфяников, подлежащих экологической реабилитации) [2].

Стратегия и план экологической реабилитации проектной территории «Погонянское-2», а также техническое задание на проектирование строительного объекта были разработаны в рамках подготовки научного обоснования повторного заболачивания нарушенного торфяника «Погонянское-2» [3]. На основе предложенных подходов по экологической реабилитации нарушенного торфяника, а также с учетом результатов полевых изысканий, выполненных проектной организацией, был разработан строительный проект по объекту «Повторное заболачивание торфяника “Погонянское-2”, расположенного в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области», реализация которого завершена в декабре 2023 г. [4].

В основе восстановления гидрологического режима нарушенных торфяников лежит главное правило: обеспечение равномерного подъема уровня воды на всей проектной территории до преобладающих уровней поверхности почвы. Для решения этой задачи на каналах осушительной сети (Чикаловский, Радинский, Ивановский, Второй Нежиховский и др.) было запланировано возведение каскада из 20 глухих земляных перемычек и двух переливных каменно-набросных перемычек на р. Несвич с перепадом уровней воды между ними около 0,3 м. Земляные перемычки запланированы в местах, где существует возможность их обтекания по более низкой поверхности широким фронтом и поступления воды на нарушенный торфяник. В ряде случаев при наличии высоких бровок каналов для обеспечения обтекания устроенных перемычек проводилось разравнивание кавальеров каналов или устройство искусственного ложа обтекания. Такой подход обеспечивает равномерное поднятие болотных вод и исключает большую амплитуду колебаний уровня грунтовых вод в течение года.

Минимизация выноса радионуклидов будет происходить за счет ряда технических решений, предусмотренных в проекте:

седиментации взвешенных минеральных и органических веществ, содержащих радионуклиды, поступающих с водой с водосбора по подводным каналам на заболачиваемые участки торфяника;

аккумуляции и консервации радионуклидов в илонакопителе, который представляет собой углубленный на 1 м участок русла р. Несвич протяженностью около 700 м. Непосредственно после илонакопителя устроена переливная каменно-набросная плотина, что приводит к замедлению течения реки и способствует седиментации взвешенных минеральных и органических веществ и их аккумуляции в донных отложениях;

минимизации вероятности возникновения пожаров и переноса радионуклидов на сопредельные территории вследствие ресуспензии.

Экологическая реабилитация нарушенных торфяников не предполагает обязательного восстановления природного комплекса до исходного состояния. Такой подход невозможен для проектной территории «Погонянское-2», так как ранее существовавшие здесь низинные болота претерпели коренные изменения в результате проведения осушительной мелиорации и длительного хозяйственного использования. Научные и технические подходы, реализованные при проведении экологической реабилитации проектной территории «Погонянское-2», были направлены на то, чтобы состав и структура сложившихся после повторного заболачивания экосистем обеспечивали выполнение ими основных биосферных функций с как можно большим приближением к естественным. В целом с учетом реализации запланированных мероприятий по проектной территории «Погонянское-2» предполагается, что восстановление низинных болот будет происходить по следующему сценарию:

на возвышенных и мало обводненных участках при УСБВ до –30 см сформируются формации мелколиственных насаждений, заболоченных черноольшаников и пушистоберезняков преимущественно осокового, осоково-травяного, болотно-папоротникового типов леса. На открытых от древесно-кустарниковой растительности участках дальнейшее распространение получит пепельноивняковая формация, выдерживающая затопление в период сезонов с избыточными осадками на глубину до 50 см от поверхности почвы;

при УСБВ около поверхности земли сохранятся участки с древовидными кустарниками осокового типа и болотным разнотравьем. При текущем УСБВ в северном секторе проектной территории сохранятся или будут формироваться березовые насаждения. Открытые безлесные участки с доминированием тростника южного являются и останутся достаточно фитоценологически устойчивым вариантом на болотах низинного типа. Луговые и синантропные сообщества трансформируются в открытые низинные

луга осоково-тростникового типа. Открытый торф в течение двух лет покрывается осоками, тростником, болотным разнотравьем, ивовыми кустарниками;

при постоянном или длительном стоянии болотных вод от 0 до 30 см от поверхности почвы произойдет отпад древостоя, мелколиственные насаждения сменятся кустарниковыми и кустарниково-тростниковыми сообществами. На открытых участках произойдет активное распространение тростника, рогоза и осок. В основном за счет повышения долевого участия в травостое тростника возрастет продуктивность наземной фитомассы сообществ;

при подъеме уровня воды выше 30 см от поверхности почвы сформируются мелководные водоемы болотного типа с водной растительностью (затопления или разливы). Затем, по мере зарастания, водоемы превратятся в тростниковые и осоковые болота. В последующем (в течение нескольких десятилетий) в результате зарастания водоемов будет формироваться единый болотный массив с ровной поверхностью. В этом случае произойдет восстановление естественных низинных болот и характерного для них биологического разнообразия. В течение 10–15 лет на всей проектной территории восстановятся водно-болотная фауна и флора;

на возвышенных участках (окраины торфяника, бровки каналов, минеральные острова и др.) будут протекать процессы естественного возобновления леса с последующим формированием насаждений лесобразующих пород.

Заключение. Работы по повторному заболачиванию нарушенных торфяников проектной территории «Погонянок-2» обеспечивают решение следующих важнейших экологических задач на локальном (ПГРЭЗ) и региональном (Белорусское Полесье) уровнях:

снижение вероятности возникновения торфяных и лесных пожаров, предотвращение залповых выбросов углекислого газа и радиоактивных веществ;

предотвращение выноса водными потоками радионуклидов, сконцентрированных в экосистемах проектной территории за пределы ПГРЭЗ, включая сопредельные территории Беларуси и Украины;

предотвращение эмиссии парниковых газов в атмосферу и сохранение масштабов стока CO₂ из атмосферы в прирост торфа;

поддержание запасов торфа в объеме 9 010,5 тыс. т и углерода в объеме 4 043,9 тыс. т и их дальнейшее накопление;

накопление и поддержание запасов воды в торфянике в объеме 34 059,69 тыс. м³ (например, запас воды в Заславском водохранилище составляет 101,0 млн м³);

восстановление гидрологического режима болотных и лугово-болотных экологических систем низинного типа;

восстановление водоохраных и средообразующих функций болот;

сохранение местного и регионального климата;

улучшение условий обитания видов диких животных, включенных в Красную книгу Республики Беларусь, обитающих на данной территории (большая выпь, малая выпь, черный аист, орлан-белохвост, змеяяд, полевой лунь, большой подорлик, чеглок, малый погоныш, коростель, серый журавль, большой кроншнеп, большой веретенник, филин, болотная сова, обыкновенный зимородок, белоспинный дятел, усатая синица, болотная черепаха);

создание важного воспроизводственного и кормового участка для ряда видов животных (лось, кабан, олень благородный, косуля европейская, бобр обыкновенный, тетерев, волк, норка, выдра и др.), являющихся неотъемлемым компонентом сбалансированной экосистемы, функционирующей в условиях хронического радиоактивного влияния.

Кроме того, заболачивание нарушенного торфяника будет являться национальным вкладом в выполнение Конвенции по борьбе с опустыниванием, Рамсарской конвенции, Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Конвенции по сохранению биологического разнообразия.

Список использованных источников

1. Стратегия сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 30 дек. 2015г. № 1111. – Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/filecca6794698dd-5407.PDF>. – Дата доступа: 15.01.2024.

2. Схема распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 17 сент. 2020 г. № 18. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22035886&p1=1>. – Дата доступа: 15.01.2024.

3. Научное обоснование экологической реабилитации нарушенного торфяника по объекту «Повторное заболачивание торфяника “Погонянок-2”»: отчет о науч.-исслед. работе / ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам»; рук. А. И. Чайковский. – Минск, 2022. – 141 с. – ГР № 20221477.

4. Строительный проект «Повторное заболачивание торфяника «Погонянок-2», расположенного в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области», объект 52/2022 ООО «ПинскЖилПроект». – Пинск, 2022. – С. 335.

Поступила 18.01.2024

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
SHORT MESSAGES
КАРОТКІЯ ПАВЕДАМЛЕННІ

ISSN 1810-9810 (Print)
УДК 311.42:001.89

Н. А. Ламан¹, А. М. Николайчук²

¹*Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: nikolai.laman@gmail.com*

²*Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы, Минск, Беларусь, e-mail: nikolaichuk@belisa.org.by*

**РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОЕКТОВ,
ПОСТУПИВШИХ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ № 10
«ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭКОЛОГИЯ» В 2019–2023 ГОДАХ**

Аннотация. Показана процедура проведения государственной экспертизы научно-исследовательских работ, претендующих на государственное финансирование, на примере анализа и результативности работы Государственного экспертного совета № 10 «Природопользование и экология» за 2019–2023 гг. от момента поступления объекта экспертизы в Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь до выдачи заключения Государственным экспертным советом. Высказаны некоторые предложения по совершенствованию процедуры проведения государственной экспертизы.

Ключевые слова: государственный экспертный совет, объект государственной экспертизы, природопользование, эксперт, заключение

N. A. Laman¹, A. M. Nikolaychuk²

¹*Institute of Experimental Botany named after V. F. Kuprevich of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: nikolai.laman@gmail.com*

²*Belarusian Institute of System Analysis and Information Support for the Scientific and Technical Sphere, Minsk, Belarus, e-mail: nikolaichuk@belisa.org.by*

**PERFORMANCE OF EXAMINATION OF PROJECTS SUBMITTED TO THE STATE EXPERT COUNCIL NO. 10
«NATURE MANAGEMENT AND ECOLOGY» IN 2019–2023**

Abstract. The article presents the procedure for conducting a state examination of research work applying for state funding, using the example of the analysis and performance of the State Expert Council No. 10 “Nature Management and Ecology” for the period 2019–2023 as a case study. It outlines the process from the moment the object of examination was received by the State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus until the issuance of a conclusion by the State Expert Council. Some proposals are put forth for the improvement of the procedure for conducting state examinations.

Keywords: State Expert Council, object of state examination, environmental management, expert, opinion

M. A. Ламан¹, А. М. Мікалайчук²

¹*Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь, e-mail: nikolai.laman@gmail.com*

²*Беларускі інстытут сістэмнага аналізу і інфармацыйнага забеспячэння навукова-тэхнічнай сферы, Мінск, Беларусь, e-mail: nikolaichuk@belisa.org.by*

**ВЫНІКІ ЭКСПЕРТЫЗЫ ПРАЕКТАЎ, ЯКІЯ ПАСТУПІЛІ Ў ДЗЯРЖАЎНЫ ЭКСПЕРТНЫ САВЕТ № 10
«ПРЫРОДАКАРЫСТАННЕ І ЭКАЛОГІЯ» Ў 2019–2023 ГАДАХ**

Анотацыя. Паказана працэдура правядзення дзяржаўнай экспертызы навукова-даследчых работ, якія прэтэндуюць на дзяржаўнае фінансаванне, на прыкладзе аналізу і рэзультатыўнасці работы Дзяржаўнага экспертнага савета № 10 «Прыродакарыстанне і экалогія» за 2019–2023 гг. ад моманту паступлення аб'екта экспертызы ў Дзяржаўны камітэт па навуцы і тэхналогіях Рэспублікі Беларусь да выдачы заключэння Дзяржаўным экспертным саветам. Выказаны некаторыя прапановы па ўдасканаленні працэдуры правядзення дзяржаўнай экспертызы.

Ключавыя словы: дзяржаўны экспертны савет, аб'ект дзяржаўнай экспертызы, прыродакарыстанне, эксперт, заключэнне

Введение. В Республике Беларусь в целях реализации государственной научно-технической политики по приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности разрабатываются государственные, отраслевые, региональные и межгосударственные научно-технические

ские программы, перечень которых, порядок разработки, финансирования и выполнения определяются Правительством по согласованию с Президентом Республики Беларусь [1].

С целью выполнения вышеперечисленных программ субъектам хозяйствования оказывается государственная финансовая поддержка из средств, выделяемых на научную, научно-техническую и инновационную деятельность, однако решение о финансировании, предоставлении налоговых льгот, государственной финансовой поддержке в ходе реализации мероприятий, обеспечивающих достижение необходимого экономического и (или) социального эффекта, принимается на основе результатов государственной экспертизы. В настоящее время в Республике Беларусь функционирует 12 Государственных экспертных советов (ГЭС) по различным направлениям научной и научно-технической деятельности [2].

Целью настоящей работы явился анализ деятельности ГЭС на примере ГЭС № 10 «Природопользование и экология» в 2019–2023 гг., а также ее результативность.

На рис. 1 представлен алгоритм проведения государственной экспертизы научных и научно-технических проектов в Республике Беларусь от момента их поступления в Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь (ГКНТ) до выдачи заключения ГЭС.

Результаты и их обсуждение. По состоянию на 3-й квартал 2024 г. ГЭС № 10 «Природопользование и экология» представлен бюро и двумя секциями – научной и научно-технической. Общая численность совета составляет 30 человек и включает 9 докторов наук, из которых 6 – доктора биологических наук, из них – 2 академика НАН Беларуси, и по 1 доктору сельскохозяйственных, географических и физико-математических наук. 20 членов экспертного совета имеют степень кандидата наук, из которых 9 – кандидаты биологических наук, 3 – кандидаты технических наук, в составе также по 2 кандидата географических, геолого-минералогических и сельскохозяйственных наук, и по 1 – медицинских и экономических наук. Кандидаты экономических наук введены в состав каждого ГЭС для проведения оценки маркетингового потенциала прикладной составляющей объектов экспертизы. Согласно Положению о порядке функционирования единой системы государственной научной и государственной научно-технической экспертиз, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22 мая 2015 г. № 431, состав экспертных советов обновляется один раз в два года не менее, чем на 30 % [2].

В целях обеспечения концентрации государственных ресурсов на реализации наиболее важных и значимых направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 утверждены приоритетные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг. [3]. Большая часть проектов, поступивших в ГЭС № 10, соответствует приоритетному направлению «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование», исследования затрагивают такие области, как ядерная и радиационная безопасность; рациональное использование, воспроизводство и управление ресурсами растительного и животного мира, лесными и водными ресурсами; биологическое и ландшафтное разнообразие; особо охраняемые природные территории; окружающая среда и климатология; полезные ископаемые и изучение недр; техника и технологии в сфере сбора, обезвреживания и использования отходов.

За период с 2019 по 2023 г. в ГЭС № 10 поступило 344 объекта государственной экспертизы, из которых 22 были возвращены заказчику, в том числе 50 % из них по причинам несоответствия наименования, сроков реализации, финансирования объекта экспертизы в заявочных документах и информационной карте. После исправления и/или доработки объекты экспертизы с такими нарушениями повторно направлялись в ГКНТ и были рассмотрены на заседаниях экспертного совета. Вторая половина возвращенных проектов из-за несоответствия тематике ГЭС № 10 была перенаправлена в другие экспертные советы: ГЭС № 1 «Естественные науки», ГЭС № 2 «Машиноведение, системы и комплексы машин, компоненты и оборудование машиностроения», ГЭС № 3 «Материаловедение, промышленные и строительные технологии, оборудование и производства», ГЭС № 7 «Сельскохозяйственные науки и технологии». Количество возвращенных проектов по годам представлено на рис. 2, наибольшая доля возвратов была в 2023 г.

Государственными заказчиками большей части объектов экспертизы за исследуемый период (250, или 72,7 %), являлась НАН Беларуси. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь было заказчиком 32 проектов (9,3 %), Министерство образования – 26 (7,8 %). Оставшиеся 10,2 % от общего числа объектов экспертизы поступили из Министерства лесного хозяйства (20), Министерства по чрезвычайным ситуациям (6), исполнительных комитетов Брестской области и Минского района (4), Министерства энергетики (2), Комитета государственного контроля (1), Белорусского инновационного фонда (1), Белорусского государственного концерна пищевой промышленности (1), Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (1) (табл. 1). Наибольшая доля отрицательных заключений ГЭС № 10 – у проектов, заказчиком которых были исполнительные комитеты Минского района и Брестской области (из 4 поступивших 3 получили отрицательные заключения).

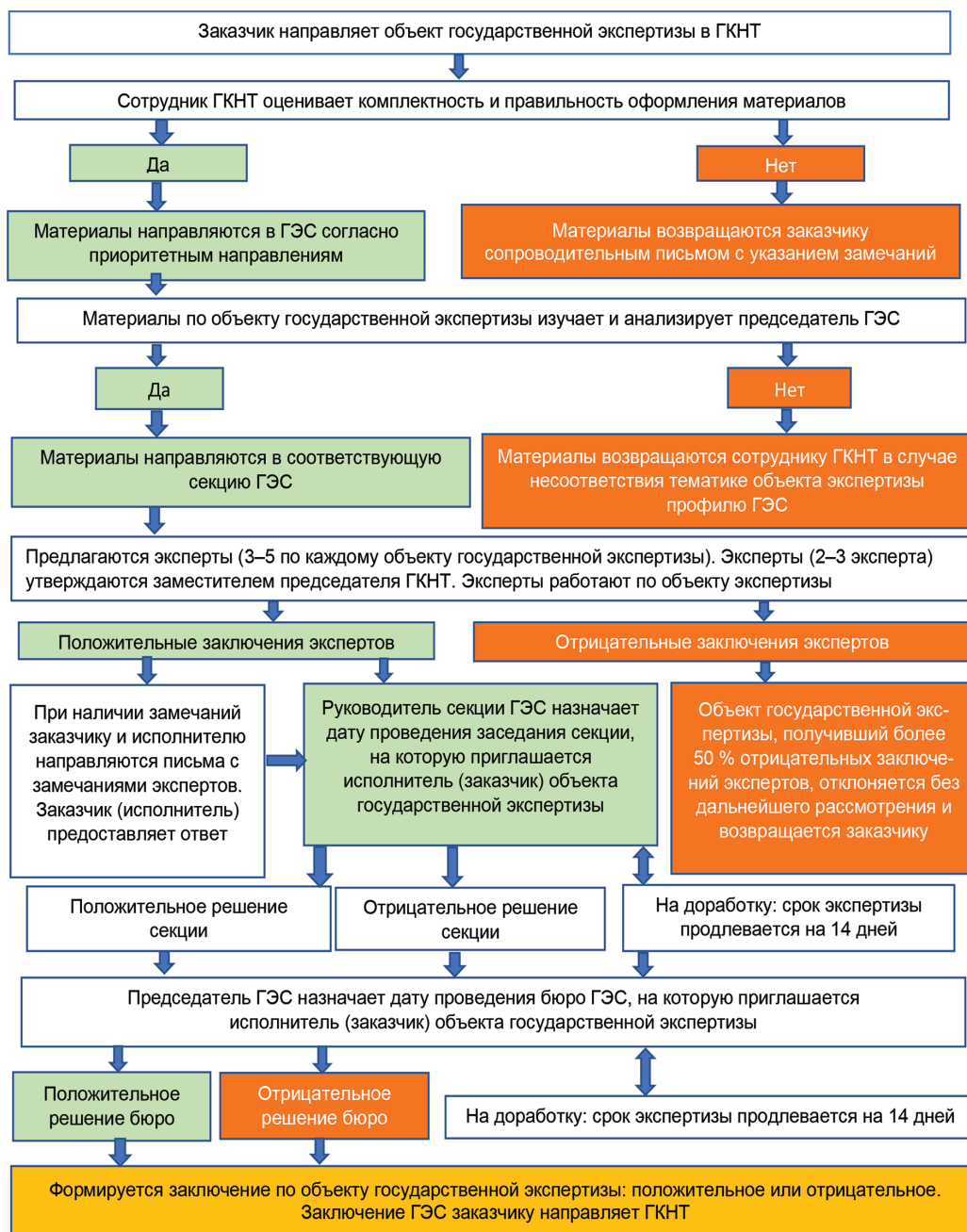


Рис. 1. Алгоритм проведения государственной научной и государственной научно-технической экспертиз в Республике Беларусь

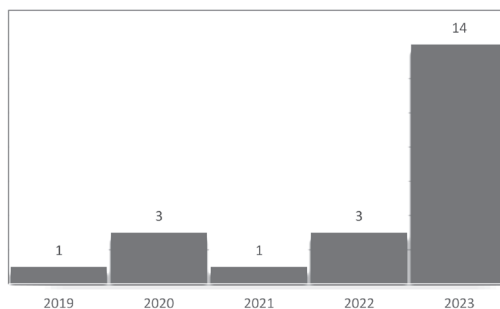


Рис. 2. Количество возвращенных проектов по годам (2019–2023 гг.)

Таблица 1. Результативность государственной экспертизы проектов, поступивших в ГЭС № 10 в 2019–2023 гг., по ведомствам

Заказчик государственной экспертизы	Количество поступивших проектов	Положительное заключение	Отрицательное заключение	≥ 50 % отрицательных заключений экспертов	Возврат по другим причинам
НАН Беларуси	251	203	11	20	17
Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды	32	29	1	2	0
Министерство образования	26	20	1	3	2
Министерство лесного хозяйства	20	19	0	1	0
Министерство по чрезвычайным ситуациям	6	6	0	0	0
Исполнительные комитеты	4	1	3	0	0
Министерство энергетики	2	1	1	0	0
Комитет государственного контроля	1	1	0	0	0
Белорусский инновационный фонд	1	0	0	0	1
Белорусский государственный концерн пищевой промышленности	1	0	0	0	1
Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований	1	0	0	0	1
Всего	344	279	17	26	22

За 5 лет получено 17 отрицательных заключений ГЭС № 10 и 26 проектов были возвращены заказчику по причине отрицательных заключений экспертов (табл. 2).

Таблица 2. Количество объектов экспертизы, получивших отрицательное заключение ГЭС № 10 и возвращенных по причине более 50 % отрицательных заключений экспертов по годам (2019–2023 гг.)

Год	Всего поступило на экспертизу	Отрицательные заключения	≥ 50 % отрицательных заключений экспертов	Всего не прошли экспертизу, (доля, в %)
2019	46	5	9	14 (30,4)
2020	70	5	4	9 (12,9)
2021	111	4	6	10 (9,0)
2022	41	1	3	4 (9,8)
2023	76	2	4	6 (7,9)

Наибольшая доля проектов, не прошедших государственную экспертизу, отмечена в 2019 г. – 30,4 %, к 2023 г. она снизилась до 7,9 %, что на фоне увеличения возвращенных проектов до их поступления в ГЭС может служить характеристикой более качественной работы ГКНТ и ГУ «БелИСА» на этапе передачи материалов в экспертный совет.

НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам являлся исполнителем большей части проектов (55), поступивших в ГЭС № 10 из НАН Беларуси за 5 лет. Доля отрицательных заключений по данным проектам составила 7,3 %, возвращенных по причине отрицательных заключений экспертов за исследуемый период не было (табл. 3).

Таблица 3. Результативность государственной экспертизы по учреждениям НАН Беларуси (представлены учреждения с количеством поступивших проектов от 3 и более)

Учреждение	Количество поступивших проектов	Результат рассмотрения			Возврат по другим причинам
		Положительное заключение	Отрицательное заключение	≥ 50 % отрицательных заключений экспертов	
НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам	55	47	4	0	4
Центральный ботанический сад	47	40	4	3	0
Институт природопользования	37	34	0	0	3
Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича	30	28	0	1	1
Институт леса	16	13	0	2	1
Институт радиобиологии	15	7	1	7	0
Институт общей и неорганической химии	8	4	0	2	2
Институт микробиологии	7	6	0	1	0
Институт жилищно-коммунального хозяйства	4	3	1	0	0
Центр геофизического мониторинга	4	3	0	0	1
Полесский государственный радиационно-экологический заповедник	3	2	0	1	0
Институт генетики и цитологии	3	2	0	0	1

Из 15 поступивших на государственную экспертизу проектов Института радиобиологии НАН Беларуси 8 получили отрицательные заключения ГЭС № 10 либо были возвращены заказчику по причине более 50 % отрицательных заключений экспертов, доля таких проектов составила более половины – 53,3 %.

Ключевыми причинами отрицательных решений ГЭС № 10 были следующие: проект не является новым для Республики Беларусь либо не содержит четко сформулированной научной проблемы; оценка целевых показателей проекта недостаточна либо объект государственной экспертизы не соответствует заявленным целям; отсутствует научно обоснованная оценка создаваемого новшества; предлагаемая разработка будет неконкурентоспособной; маркетинговые и патентные исследования не проведены; заявленное финансирование не соответствует планируемому объему выполняемых работ; объект государственной экспертизы не соответствует своему наименованию; отсутствуют данные об объеме планируемых полевых и лабораторных исследований, что затрудняет оценку статистической обоснованности и значимости планируемых результатов.

Не получили отрицательных заключений ГЭС № 10 и отрицательных заключений экспертов проекты, исполнителями которых были: Институт природопользования НАН Беларуси, Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси и Институт генетики и цитологии НАН Беларуси.

Большая часть поступивших в 2019–2023 гг. объектов государственной экспертизы – 207 (60,2 %) – это проекты заданий межгосударственных, государственных, региональных и отраслевых научно-технических программ, мероприятий по научному обеспечению государственных программ. В рамках выполнения государственных программ (ГП) в ГЭС № 10 поступил 121 проект, из которых 52 проекта (42,9 %) заявлены в ГП «Наукоемкие технологии и техника»; 31 проект (25,6 %) выполняется в ГП «Научно-инновационная деятельность НАН Беларуси»; 23 (19,1 %) – в ГП по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС; 15 (12,4 %) – в ГП «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов».

В рамках выполнения государственных и отраслевых научно-технических программ (НТП, ГНТП, ОНТП) поступило 86 объектов экспертизы, выполнение 39 проектов, или 45,4 %, запланировано в рамках реализации ГНТП «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности»; 16 проектов (18,6 %) заявлены в ОНТП «Интродукция и инвазии»; 10 (11,6 %) – в ОНТП «Сохранение устойчивого развития лесов с учетом изменения климата»; 8 проектов (9,3 %) – в ГНТП «Природопользование и экологические риски», выполнявшейся до 2020 г.

Проекты заданий государственных программ научных исследований (ГПНИ) составили 16,3 % (56) от всех проектов, поступивших на экспертизу за 5 лет. Наиболее популярна за исследуемый период ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», в рамках выполнения которой поступило 44 проекта (78,6 %). 15,7 % от общего количества поступивших за 5 лет (54 проекта) – это научно-технические проекты, выполняемые в рамках международных договоров Республики Беларусь. Международное научно-техническое сотрудничество в 2019–2023 гг. по направлению «Природопользование и экология» осуществлялось: в 2019 г. – с Узбекистаном, Украиной, Израилем, Германией; в 2020 г. – с Сербией, Польшей, Вьетнамом, Латвией; в 2021 г. – с Сербией, Казахстаном, Узбекистаном; в 2023 г. – с Россией, Китаем.

В 2022 г. международное сотрудничество по направлению «Природопользование и экология» не осуществлялось.

По завершённым проектам получено 431 заключение экспертов, большая часть из которых (261) выполнена экспертами ведомственной принадлежности Министерства образования; 108 – Национальной академии наук Беларуси; 21 – Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды; 5 – Министерства здравоохранения и 36 – экспертами из других организаций (Управление делами Президента, ГКНТ, Министерство лесного хозяйства, ОАО и др.).

По поступившим в ГЭС № 10 проектам можно судить о наиболее острых и актуальных вопросах в области природопользования и экологии. Большая часть материалов, поступивших в 2023 г., касалась исследований растительных сообществ (например, инвазивные виды растений (мелколепестничек канадский, клен ясенелистный, робиния ложноакация и др.), а также возможности их использования в качестве ценного растительного источника биологически активных веществ. Планируется изучить свойства березового гриба чага в зависимости от условий его произрастания с оценкой перспективности практического использования препаратов, полученных на его основе. Продолжаются исследования лесных экосистем: успех интродукции бука лесного; анализ патологической ситуации в хвойных лесах на основе данных наземного и дистанционного мониторинга с использованием беспилотных авиационных комплексов для оперативного выявления очагов болезней и вредителей леса; исследование лесовозобновительных процессов в естественных фитоценозах и др. Интересным и новым для республики является проект, направленный на разработку критериев адаптационной оценки растений в условиях искусственных миниэкосистем, приуроченный к полету белорусского космонавта на борту российского сегмента МКС и выполняемый в рамках подпрограммы «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» ГП «Наукоемкие технологии и техника».

Примерами проектов, направленных на изучение животного мира республики, являются: анализ ДНК древних диких животных и растений; негативное воздействие караса серебряного на аборигенную ихтиофауну; значение летучих мышей в циркуляции бактериальных инфекций; обследование популяций длиннопалого рака на наличие заболеваний; исследование популяционной экологии и кишечной микробиоты благородного оленя и др. Не остаются в стороне вопросы в области радиоактивного загрязнения, производства удобрительных добавок, а также антарктические исследования.

Заключение. Экспертиза позволяет качественно, объективно, учитывая мнение экспертов и членов экспертного совета, за установленный промежуток времени провести исследование рассматриваемого объекта на предмет актуальности, новизны, возможности выполнения за заявленное финансирование в требуемые сроки с выдачей заключения и оценкой рассматриваемого объекта экспертизы, а в некоторых случаях с рекомендациями для более успешного выполнения научной работы.

Для повышения уровня научных проектов и получения качественного продукта в процессе их реализации при прохождении всех этапов государственной экспертизы необходимо:

исполнителю при формировании заявки по объекту государственной экспертизы принимать во внимание проблемы, касающиеся отрасли в целом, а также привлекать соисполнителей для выполнения исследований (несогласованность между различными организациями, занимающимися научными исследованиями в одной области, может привести к дублированию усилий и неэффективному использованию ресурсов);

принимать во внимание все замечания и рекомендации экспертов и членов экспертного совета, выполнять необходимые корректировки для улучшения качества научной работы; поддерживать открытую коммуникацию с экспертами через секретаря экспертного совета, предоставлять по их требованию дополнительную информацию по объекту государственной экспертизы.

Для исключения возврата объекта государственной экспертизы до поступления в экспертный совет материалы по объекту государственной экспертизы должны соответствовать требованиям заказчика, законодательства, нормативным актам.

Следует избегать ошибок при подготовке материалов, для чего при формировании заявки в ГНТП руководствоваться приказом ГКНТ от 18 июля 2019 г. № 208 «Об установлении примерных форм документов по разработке и выполнению научно-технических программ, мероприятий по научному обеспечению государственных программ», а также приказом ГКНТ от 16 августа 2024 г. № 238 «Об изменении приказа ГКНТ от 18 июля 2019 г. № 208» [5].

При подготовке документов, представляемых для проведения государственной научной экспертизы, проекта задания в ГПНИ и задания ГП научных исследований в части изменений, вносимых в данное задание, важно руководствоваться методическими рекомендациями, подготовленными НАН Беларуси и одобренными постановлением Бюро Президиума НАН Беларуси от 30 августа 2023 г. № 366.

Таким образом, совместная и качественная работа заказчика, ГКНТ и ГЭС будет содействовать развитию научных и научно-технических исследований в Республике Беларусь на современном методическом уровне и показывать высокую результативность в решении актуальных задач.

Список использованных источников

1. Реализация государственных научно-технических программ в 2021 году. – Минск: БелИСА, 2022. – 116 с.
2. О порядке функционирования единой системы государственной научной и государственной научно-технической экспертиз [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22 мая 2015 г., № 431 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21500431>. – Дата доступа: 01.04.2024.
3. О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 7 мая 2020 г., № 156 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid>. – Дата доступа: 05.04.2024.
4. Нормативное обеспечение экспертизы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gknt.gov.by/deyatelnost/gosudarstvennaya-ekspertiza>. – Дата доступа: 01.04.2024.
5. Об установлении примерных форм документов по разработке и выполнению научно-технических программ, мероприятий по научному обеспечению государственных программ [Электронный ресурс]: приказ Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь, 18 июля 2019 г., № 208. – Режим доступа: https://www.gknt.gov.by/-deyatelnost/gosudarstvennaya-ekspertiza/nauchno_tekhnicheskie_programmy_proekty_razdely_nauchnogo_obespecheniya_gosudarstvennykh_programm. – Дата доступа: 05.04.2024.

Поступила 23.05.2024