

Веснік

Брэсцкага ўніверсітэта

Рэдакцыйная калегія

галоўны рэдактар
Ю. П. Голубеў

намеснік галоўнага рэдактара
М. А. Багдасараў

адказны рэдактар
Н. С. Ступень

І. В. Абрамава (Беларусь)
А. А. Афонін (Расія)
А. М. Вігчанка (Беларусь)
А. А. Волчак (Беларусь)
А. І. Градунова (Беларусь)
В. В. Грычык (Беларусь)
С. В. Емяльянчык (Беларусь)
В. Ф. Кулеш (Беларусь)
В. У. Марцірасян (Расія)
А. А. Махнач (Беларусь)
А. В. Мацвееў (Беларусь)
У. У. Салтанаў (Беларусь)
А. А. Сідаровіч (Беларусь)
А. М. Тарасюк (Беларусь)
Я. К. Яловічава (Беларусь)

Пасведчанне аб рэгістрацыі
ў Міністэрстве інфармацыі
Рэспублікі Беларусь
№ 1339 ад 28 красавіка 2010 г.

Адрас рэдакцыі:
224016, г. Брэст,
бульвар Касманаўтаў, 21
тэл.: +375-(162)-21-72-07
e-mail: vesnik@brsu.brest.by

Часопіс «Веснік Брэсцкага
ўніверсітэта» выдаецца
са снежня 1997 года

Серыя 5

БІЯЛОГІЯ

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

НАВУКОВА-ТЭАРЭТЫЧНЫ ЧАСОПІС

Выходзіць два разы ў год

Заснавальнік – Установа адукацыі
«Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна»

№ 2 / 2023

У адпаведнасці з Дадаткам да загада
Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь
ад 05.01.2023 № 2 (са змяненнямі, унесенымі загадам
ад 23.06.2023 № 152) часопіс «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта.
Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі»
ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь
для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў у 2023 г.
па біялагічных, геаграфічных і геалага-мінэралагічных навуках

◇ ◇ ◇

У адпаведнасці з дагаворам паміж установай адукацыі
«Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна»
і ТАА «Навуковая электронная бібліятэка» (ліцэнзійны дагавор
№ 457-11/2020 ад 03.11.2020) часопіс «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта.
Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі»
размяшчаецца на платформе eLIBRARY.RU
і ўключаны ў Расійскі індэкс навуковага цытавання (РІНЦ)

ЗМЕСТ

НАШЫ ЮБІЛЯРЫ

Абрамова И. В., Грядунова О. И.

Современный ученый: талантливый, энергичный, целеустремленный
(к 50-летию Максима Альбертовича Богдасарова)5

БІЯЛОГІЯ

Буцько А. А., Родькин О. И., Пашинский В. А.

Продукционные характеристики *SALIX ALBA*
и ее фитоэкстракционная способность в отношении азота и фосфора 8

Демянчик В. Т., Лукьянчик М. А., Демянчик В. В.

Орнитофауна в условиях теплой зимовки 2022/2023 гг. в городе Бресте (Беларусь) 19

Кацнельсон Е. И., Беляева Л. С., Курчанова В. В., Гузова Я. Д.

Индикация природных водоемов Витебской области по биотическому индексу26

Коваленко В. В., Ленивко С. М., Ступень Н. С.

Рострегулирующая и протекторная активность кремнийорганического соединения KE-373
на культуре ржи посевной (*SECALE CEREALE L.*)..... 35

Кремза А. А., Ларченко А. Ю., Василенко С. Л., Мандрик М. И.

Разнообразие и метаболический потенциал микроорганизмов
из почв сельскохозяйственного назначения.43

Ленивко С. М., Карунос А. С.

Индукция соматического эмбриогенеза у различных эксплантов фаленопсиса гибридного.53

Цуриков А. Г., Голубков В. В., Белый П. Н., Болсун И. М.

Ревизия лишайников рода *BRYORIA* Беларуси.
I. B. CAPILLARIS и *B. NADVORNIKIANA* 61

Черней И. С.

Антибиопленочная активность природных соединений в отношении *CANDIDA SPP*70

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

Галкин А. Н., Матвеев А. В.

Геохимические особенности толщи четвертичных отложений на территории Витебской области 81

Гусев А. П.

Потоки метана в тропосфере как индикатор современной геодинамической активности
(на примере юго-востока Беларуси) 90

Литвинюк Г. И.

Новые данные о геологическом строении и семенной флоре разреза Островец 100

Михальчук Н. В., Качанович П. В., Хвашевский М. И., Подлужная А. М.

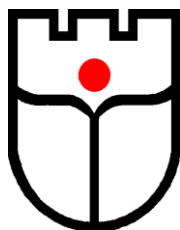
Содержание тяжелых металлов в почвах импактных зон
некоторых полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области 111

Никитюк О. О., Богдасаров М. А.

Взаимосвязь состояния атмосферного воздуха
с заболеваемостью взрослого населения Брестской области 121

Сидорович А. А.

Методологические аспекты
экономико-географического обоснования региональной миграционной политики Беларуси 128



Vesnik

of Brest University

Editorial Board

editor-in-chief
Yu. P. Golubeu

deputy editor-in-chief
M. A. Bahdasarau

managing editor
N. S. Stupen

I. V. Abramava (Belarus)
A. A. Afonin (Russia)
A. M. Vitchanka (Belarus)
A. A. Volchak (Belarus)
A. I. Hradunova (Belarus)
V. V. Hrychyk (Belarus)
S. V. Yemialianchyk (Belarus)
V. F. Kulesh (Belarus)
V. U. Martsirasyan (Russia)
A. A. Makhnach (Belarus)
A. V. Matsveyeu (Belarus)
U. U. Saltanau (Belarus)
A. A. Sidarovich (Belarus)
A. M. Tarasiuk (Belarus)
Ya. K. Yalovichava (Belarus)

Registration Certificate
by Ministry of Information
of the Republic of Belarus
nr 1339 from April 28, 2010

Editorial Office:
224016, Brest,
21, Kosmonavtov Boulevard
tel.: +375-(162)-21-72-07
e-mail: vesnik@brsu.brest.by

Published since December 1997

Series 5

BIOLOGY

SCIENCES ABOUT EARTH

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

Issued twice a year

Founder – Educational Establishment
«Brest State A. S. Pushkin University»

№ 2 / 2023

According to the Supplement to the order of Supreme Certification
Commission of the Republic of Belarus from January 05, 2023 nr 2
(with the amendments made by the order of Supreme Certification
Commission from June 23, 2023 nr 152)
the journal «Vesnik of Brest University.

Series 5. Biology. Sciences about earth» has been included
to the List of scientific editions of the Republic of Belarus
for publication of the results of scientific research in 2023
in biological, geographical and geological-mineralogical sciences

◇ ◇ ◇

According to the agreement
between Educational Establishment
«Brest State A. S. Pushkin University» and Pvt Ltd «Scientific Electronic
Library» (licence contract № 457-11/2020 from 03.11.2020)
the journal «Vesnik of Brest University.
Series 5. Biology. Sciences about earth »
is placed on the platform eLIBRARY.RU
and included in the Russian Science Citation Index (RSCI)

CONTENTS

OUR ANNIVERSARIES

Iryna Abramava, Aksana Hradunova Modern Scientist: Talented, Energetic, Purposeful (to the 50th Anniversary of Maxim Bogdasarov)	5
---	---

BIOLOGY

Andrei Butsko, Aleg Rodzkin, Vasil Pashynski Production Characteristics of <i>SALIX ALBA</i> and Its Phytoextraction Ability in Regard to Nitrogen and Phosphorus	8
Victar T. Dziamianchyk, Mihail Lukyanchik, Victar V. Dziamianchyk Avifauna under Warm Wintering Conditions 2022/2023 in the City of Brest	19
Ekaterina Katsnelson, Lilia Belyaeva, Valeria Kurchanova, Yanina Guzova Indication of Natural Water Bodies in Vitebsk Region According to the Biotic Index	26
Viktar Kavalenka, Svetlana Lenivko, Nonna Stupen Growth-Regulating and Protective Activity of Organosilicon Compound KE-373 on Rye (<i>Secale Cereale</i> L.)	35
Aliona Kremza, Alina Larchenka, Svetlana Vasylenko, Maryia Mandryk Diversity and Metabolic Potential of Microorganisms from Agricultural Soils	43
Svetlana Lenivko, Artur Karunos Induction of Somatic Embryogenesis in Various of <i>Phalaenopsis</i> Hybrid of the Explants	53
Andrei Tsurykau, Vladimir Golubkov, Pavel Bely, Iryna Bolsun Revision of Lichens of the Genus <i>BRYORIA</i> in Belarus. <i>I. B. CAPILLARIS</i> and <i>B. NADVORNIKIANA</i>	61
Iryna Chernei Antibiofilm Activity of Natural Compounds Against <i>CANDIDA SPP</i>	70

SCIENCES ABOUT EARTH

Alexander Galkin, Alexey Matveev Geochemical Features of the Quaternary Deposits in the Vitebsk Region	81
Andrei Gusev The Tropospheric Methane Flows as an Indicator of Contemporary Geodynamic Activity (on the Example of the South-East of Belarus)	90
Georgiy Litvinyuk New Data on The Geological Structure and Seed Flora of The Ostrovets Section	100
Mikalay Mikhalechuk, Polina Kachanovich, Maksim Khvashcheuski, Hanna Padluzhnaya The Content of Heavy Metals in the Soils of Impact Zones of Some Landfills of the Brest Region	111
Oksana Nikitsiuk, Maksim Bogdasarov Interrelation of the State of Atmospheric Air with Incidence in the Adults of the Brest Region	121
Alexandr Sidorovich Methodological Aspects of the Economic and Geographical Substantiation of the Regional Migration Policy of Belarus	128

НАШЫ ЮБІЛЯРЫ

СОВРЕМЕННЫЙ УЧЕНЫЙ: ТАЛАНТЛИВЫЙ, ЭНЕРГИЧНЫЙ, ЦЕЛЕУСТРЕМЛЕННЫЙ

к 50-летию Максима Альбертовича Богдасарова



24 октября 2023 г. исполнилось 50 лет доктору геолого-минералогических наук, профессору, члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси Максиму Альбертовичу Богдасарову, ученому-геологу, широко известному в Беларуси и за ее пределами исследователю в области ископаемых смол и кайнозойских отложений.

Родился будущий исследователь в 1973 г. в Ташкенте в семье геолога и химика. В 1979 г. Богдасаровы переехали в Брест, и с той поры жизнь и судьба Максима Альбертовича связаны с Беларусью. Родители – отец, Альберт Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, и мама, Тамара Филипповна, химик-неорганик, – с раннего детства пробудили у сына любовь к природе и интерес к изучению минералов и горных пород. Эти качества и определили жизненный выбор будущего геолога: в 1990 г. после окончания средней школы № 9 г. Бреста он поступил в Брестский государственный педагогический институт имени А. С. Пушкина на специальность «География и биология» факультета естествознания. В это время он начал заниматься исследованием белорусского янтаря. Окончив институт с отличием, Максим Альбертович в 1995 г. приступил к работе в родном вузе ассистентом-стажером кафедры географии Беларуси.

Осенью 1995 г. Максим Альбертович поступил в аспирантуру Института геологических наук Национальной академии наук Беларуси по специальности «Общая и региональная геология».

Большое влияние на его судьбу оказал научный руководитель академик Алексей Васильевич Матвеев, признанный лидер белорусской школы геологов-четвертичников. В октябре 1998 г. Максим Альбертович познакомился с академиком Российской академии наук Николаем Павловичем Юшкиным, выступившим официальным

оппонентом его кандидатской диссертации «Янтарь из антропогенных отложений Беларуси». Это положило начало их длительному сотрудничеству, которое способствовало расширению научного кругозора молодого исследователя и глубинному пониманию им проблемы генезиса ископаемых смол.

После окончания аспирантуры в 1998 г. кандидат геолого-минералогических наук М. А. Богдасаров вернулся на кафедру географии Беларуси, где работал сначала ассистентом, а затем – старшим преподавателем и доцентом. В 2003 г. ему было присвоено ученое звание доцента по специальности «Геология».

В 2005 г. Максим Альбертович поступил в докторантуру Института геохимии и геофизики Национальной академии наук Беларуси (в 2008 г. был объединен с Белорусским научно-исследовательским геолого-разведочным институтом) по специальности «Общая и региональная геология», а после ее окончания возвратился в родной университет. В апреле 2009 г. он защитил диссертацию «Ископаемые смолы Северной Евразии» на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук (научный консультант – академик А. В. Матвеев).

В июле 2010 г. Максим Альбертович возглавил кафедру географии Беларуси. Это был важный этап приобретения новых для него навыков администратора и руководителя. В результате самая маленькая кафедра географического факультета постепенно стала выходить на ведущие позиции в университете по научно-исследовательской и учебно-методической работе. В 2013 г. М. А. Богдасарову было присвоено ученое звание профессора по специальности «Геология».

В 2015 г. Максим Альбертович возглавил кафедру географии и природопользования, образованную в результате реструктуризации кафедр географии Беларуси, физической географии и охраны природы, социально-экономической географии и туризма. В ноябре 2017 г. он был избран членом-корреспондентом Национальной академии наук Беларуси по специальности «Геология», чему способствовала плодотворная научная деятельность и широкая и активная поддержка его кандидатуры научно-педагогической общественностью Беларуси, России и других стран.

С декабря 2020 г. по настоящее время Максим Альбертович работает профессором кафедры географии и природопользования: читает лекции по дисциплинам «Геология с основами почвоведения», «Геоморфология», «Палеогеография», «Геоурбанистика» для студентов и магистрантов факультета естествознания, проводит практические работы и учебные (полевые) практики.

Максим Альбертович был руководителем ряда заданий, выполнявшихся в рамках государственных программ научных исследований, руководителем и участником нескольких международных научно-исследовательских проектов. Проходил стажировки в Институте природопользования Национальной академии наук Беларуси (2012), Палеонтологическом институте Российской академии наук (2014), Вильнюсском университете (2017).

В этот период деятельность Максима Альбертовича Богдасарова охватывала полные циклы работ (от научной идеи до практической реализации и признания результатов исследований в Беларуси и за рубежом) и была посвящена решению двух основных проблем: установлению особенностей формирования, распространения, свойств, состава различных видов ископаемых смол, а также обоснованию перспектив выявления их новых залежей в мезозойских и кайнозойских отложениях Северной Евразии; созданию комплексной картины строения и особенностей формирования четвертичных отложений Брестской области как основы для прогноза расположения залежей полезных ископаемых и рационального использования геологической среды.

В настоящее время вместе со своими учениками М. А. Богдасаров изучает структурно-вещественные комплексы кайнозоя юго-запада Беларуси, определяет

площади, которые могут содержать строительные пески, песчано-гравийные материалы, глинистые отложения и др.

М. А. Богдасаров – автор около 400 научных и учебно-методических работ, среди которых 15 монографий, 8 учебных пособий с грифом Министерства образования Республики Беларусь, а также более чем 150 статей в научных журналах и сборниках (в том числе в журналах, включенных в базы данных Web of Science, Scopus и GeoRef). Он участник многочисленных международных и республиканских научных мероприятий, организатор серии международных научно-практических конференций «Актуальные проблемы наук о Земле» в БрГУ имени А. С. Пушкина (в 2023 г. прошла уже в шестой раз) и трех международных полевых симпозиумов по проблемам геологии и палеогеографии четвертичного периода.

Активная научная и учебно-методическая работа стала основанием для приглашения М. А. Богдасарова в 2013 г. в состав экспертного совета Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь по научному направлению «Науки о Земле», экспертного совета Министерства образования Республики Беларусь по научному направлению «Экология, природные ресурсы, ресурсосбережение, природопользование и защита от чрезвычайных ситуаций» и научно-методического совета при Министерстве образования Республики Беларусь (секция географии и картографии).

М. А. Богдасаров дважды, в 1999 и 2011 гг., становился стипендиатом Президента Республики Беларусь. В 2005 г. он стал лауреатом премии имени В. Ф. Купревича для молодых ученых Национальной академии наук Беларуси, в 2012 г. – обладателем персональной надбавки Президента Республики Беларусь за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие республики в области науки.

В 2013 г. Максиму Альбертовичу была присуждена премия имени С. Г. Кондратени БрГУ имени А. С. Пушкина (совместно с Н. Ф. Гречаником и А. В. Матвеевым).

За плодотворный труд в системе образования, значительный личный вклад в развитие научных исследований М. А. Богдасаров награжден грамотой Министерства образования Республики Беларусь (2010), Почетной грамотой Министерства образования Республики Беларусь (2015), Почетной грамотой Национальной академии наук Беларуси (2015), нагрудным знаком «Выдатнік адукацыі Рэспублікі Беларусь» (2023).

И. В. Абрамова,

кандидат биологических наук, доцент,

доцент кафедры географии и природопользования

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

О. И. Грядунова,

кандидат географических наук, доцент,

заведующий кафедрой географии и природопользования

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Уважаемый Максим Альбертович!

Редакционная коллегия научно-теоретического журнала «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі» сердечно поздравляет Вас с Вашим славным юбилеем и выражает искреннюю признательность за большой вклад в развитие журнала, членом редакционной коллегии, постоянным автором и рецензентом которого Вы являетесь. Искренне желаем Вам крепкого здоровья и творческих успехов в Вашей научно-педагогической деятельности!

УДК 57.045

Андрей Анатольевич Бутько¹, Олег Иванович Родькин², Василий Антонович Пашинский³

¹ст. преподаватель каф. энергоэффективных технологий

Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета

²д-р биол. наук, доц., зам. директора по учебной работе

Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета

³канд. техн. наук, доц., зав. каф. энергоэффективных технологий

Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета

Andrei Butsko¹, Alek Rodzkin², Vasil Pashynski³

¹Senior Lecturer of the Department of Energy Efficient Technologies
of International Sakharov State Environmental Institute
of Belarusian State University

²Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,
Deputy Director for Education of International Sakharov State Environmental Institute
of Belarusian State University

³Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Chair of the Department of International Sakharov State Environmental Institute
of Belarusian State University

e-mail: ¹butko_andrei@mail.ru; ²aleh.rodzkin@rambler.ru; ³pashynski@mail.ru

ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SALIX ALBA И ЕЕ ФИТОЭКСТРАКЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ В ОТНОШЕНИИ АЗОТА И ФОСФОРА

Впервые получены морфологические параметры и биопродукционные характеристики растений *Salix alba*, используемых в качестве вегетационных фильтров для аккумуляции азота и фосфора на территории агроландшафтов. По данным морфологических показателей и урожайности *Salix alba*, установлены необходимые эмпирические коэффициенты и предложена формула для расчета продуктивности растения. Результаты моделирования урожайности надземной биомассы *Salix alba* характеризуются весьма высокой количественной и качественной характеристикой силы связи. Фитоэкстракционная способность надземной биомассы растения в отношении азота в конце первого трехлетнего периода роста (2011–2013 гг.) составила $108,95 \pm 1,70$ кг/га, фосфора – $35,68 \pm 0,47$ кг/га. Доказано, что растения *Salix alba* могут культивироваться без дополнительного внесения минеральных удобрений при посадке плантаций в пониженных местах рельефа на территории водосбора, представленного преимущественно пахотными землями.

Ключевые слова: вегетационный фильтр, ива, *Salix alba*, продуктивность, урожайность, органы растений, аккумуляция азота и фосфора.

Production Characteristics of SALIX ALBA and Its Phytoextraction Ability in Regard to Nitrogen and Phosphorus

For the first time, morphological parameters and bioproductive characteristics of *Salix alba* plants used as vegetative filters for the accumulation of nitrogen and phosphorus in agrolandscapes were obtained. According to the morphological parameters and yield of *Salix alba*, the necessary empirical coefficients were established and a formula was proposed for calculating the productivity of the plant. The results of modeling the productivity of the aboveground biomass of *Salix alba* are characterized by a very high quantitative and qualitative characteristic of the bond strength. Phytoextraction capacity of aboveground plant biomass in relation to nitrogen at the end of the first three-year growth period (2011–2013) was $108,95 \pm 1,70$ kg/ha, phosphorus $35,68 \pm 0,47$ kg/ha. It has been proven that *Salix alba* plants can be cultivated without additional application of mineral fertilizers when planting plantations in low relief areas in the catchment area, represented mainly by arable land.

Key words: vegetation filter, willow, *Salix alba*, productivity, yield, plant organs, nitrogen and phosphorus accumulation.

Введение

Актуальность проблемы охраны водных ресурсов в сельском хозяйстве усиливается в современных условиях и в большей степени проявляется при попадании загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты от рассредоточенных (не точечных) источников [1]. Сельское хозяйство является основным источником диффузного загрязнения. При этом сток с сельскохозяйственных территорий несет наибольшую угрозу качественному состоянию вод в связи с поступлением в них значительного объема биогенных веществ – соединений азота и фосфора. Это преимущественно связано с расширением использования неорганических азотных и фосфорных удобрений, что приводит к избыточному содержанию азота и фосфора в природных водах и эвтрофикации поверхностных водных объектов [2; 3].

Фиторемедиация является одним из наиболее экологически безопасных и эффективных с экономической точки зрения методов восстановления поврежденных экосистем по отношению к другим технологиям ремедиации [4; 5]. Технология фиторемедиации основывается на использовании растений для удаления неорганических и/или органических веществ из окружающей среды, при этом растения способны успешно устранять загрязнители посредством процессов адсорбции, транспортировки и транслокации, гипераккумуляции или трансформации и минерализации [6–8]. Достоверно известно, что вегетационные фильтры на основе многолетних растений выполняют важную роль естественного фильтра-очистителя, улучшающего органолептические свойства и химический состав воды, поступающей с водосборных площадей в водоемы [9; 10]. Вегетационные фильтры, размещаемые на границе между источниками загрязнения и водной средой, являются потенциальным средством решения проблем, связанных с диффузным загрязнением [11]. Наряду с этим снижение воздействия сельского хозяйства на окружающую среду достигается путем внедрения многофункциональной системы производства растительной биомассы для целей биоэкономики [12].

Растения ивы обладают значительным потенциалом для фитоэкстракции благодаря их способности аккумулировать значительное количество питательных элементов тканями растений [13–15]. Известно, что при урожайности ивы 17–40 т/га, полученной за два года роста, потенциальный вынос азота с биомассой ивы составил 201–485 кг, фосфора – 30–70 кг [16]. Другие исследования [17] свидетельствуют, что за один трехлетний период роста растения фитоэкстракционная способность ивы в отношении азота составила 116–447 кг/га, фосфора – 23–86 кг/га.

Целью данного исследования являлось изучение морфологических параметров и биопродукционных характеристик растений *Salix alba*, используемых в качестве вегетационных фильтров для аккумуляции азота и фосфора на территории агроландшафтов.

Материалы и методы исследований

Полевой эксперимент для оценки морфологических параметров и биопродукционных характеристик растений *Salix alba*, а также аккумуляции азота и фосфора надземной биомассой растения проведен на базе учебно-научного комплекса «Волма», граничащего с угодьями сельскохозяйственного производственного кооператива «Холодон-Агро» Дзержинского района Минской области, в 2011–2016 гг. Экспериментальная площадка расположена в ложбине стока с координатами ($\varphi = 53^{\circ}52'35,43''$, $\lambda = 26^{\circ}58'20,32''$), которая сопряжена с сельскохозяйственными (пахотными) землями, систематически обрабатываемыми и используемыми под посеvy сельскохозяйственных культур.

Общая площадь водосбора в рамках ложбины стока составляет 1,32 га, из них: восточный склон – 0,48 га, северо-западный склон – 0,84 га. Средняя длина северо-западного склона составляет 200 м, восточного – 84,5 м. Средняя длина обоих склонов

в границах водосбора – 126,5 м. Длина ложбины стока – 102 м. Средний уклон северо-западного склона – 0,066 м/м, восточного – 0,138 м/м. Среднезвешенный уклон обоих склонов – 0,092 м/м.

Степень влагообеспеченности по гидротермическому коэффициенту увлажнения Селянинова характеризует 2012 г. как влажный, 2011 и 2014 гг. – оптимальные, 2013 и 2016 гг. – слабозасушливые, 2015 г. – засушливый.

Почва экспериментального участка дерново-подзолистая, развивающаяся на песчанисто-лессовидном суглинке, подстилаемом моренным суглинком. Агрохимический состав почвы: рН в КСІ – 5,6, гумус – 2,22 %, P_2O_5 – 61,1 мг/кг. Объектом исследования служил сорт Волмянка ивы белой (*Salix alba*), внесенный в Государственный реестр сортов и древесно-кустарниковых пород Республики Беларусь [18].

В качестве посадочного материала применялись одревесневшие черенки в безлиственном состоянии длиной от 20 до 25 см, полученные из стадийно молодых частей *Salix alba*. Диаметр черенков в верхнем срезе составил не менее 1 см и не более 2 см. Посадка черенков выполнялась толстым концом вниз на глубину 15–22 см под углом 20–35 ° к поверхности почвы с сохранением надземной части в 3–4 см. Количество почек на надземной части черенка составляло 1–3 шт. Посадка черенков произведена 27.04.2011 г. Перед посадкой черенки замачивали на срок 4 суток для лучшего приживания. При подготовке участка осенью вносили гербицид сплошного действия (глифосат) для подавления сорной растительности. Удобрения при посадке ивы не вносились в соответствии с задачами исследований. Элементы питания растений поступали с территории расположенного на водосборе агроландшафта в соответствии с расположением экспериментального поля на пониженном участке рельефа.

Длина экспериментальной делянки – 25 м, ширина – 11 м, общая площадь – 275 м². На территории экспериментального участка выделены 4 делянки размером 50 м². Форма делянки прямоугольная. Длинная сторона делянки расположена перпендикулярно линии тальвега в ложбине стока. Повторность опыта четырехкратная. Расстояние между опытными делянками составляло 1,4 м. Схема посадки растений ленточная двухрядная, с расстоянием между лентами 140 см, между рядами в ленте – 70 см и между растениями в ряду – 50 см.

Оценка морфологических параметров и биопродукционных характеристик растений выполнена согласно методике полевого опыта [19; 20]. Измерения морфологических параметров проводили через каждые две недели начиная с посадки черенков ивы. Для измерения высоты растений использовали рулетку. Измерения проводили от корневой шейки до самой высокой точки растения. Диаметр стебля растений определяли штангенциркулем. Количество стеблей на одно растение определяли как среднеарифметический показатель из выборки растений по опытным вариантам.

Массовая доля общего азота в растениях определена методом Кьельдаля (ГОСТ 26715-85) [21], массовая доля общего фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26717-85) [22].

Статистическая обработка результатов моделирования выполнена с помощью статистического пакета STATISTICA v.10.

Результаты и их обсуждение

Несмотря на отсутствие предпосадочного внесения удобрений процент приживаемости растений ивы на экспериментальном участке был достаточно высоким. Коэффициент приживаемости растения к концу 1-го и 2-го годов роста составил 0,944, 3-го года роста – 0,907. Такие показатели, в соответствии с данными литературных источников, не уступают величине коэффициента приживаемости, полученной для растений ивы при условии внесения удобрений в полной потребности.

Основные морфологические параметры и урожайность *Salix alba* за два трехлетних периода роста представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Морфологические параметры и урожайность *Salix alba* за два трехлетних периода роста

Параметр	1-й трехлетний период			2-й трехлетний период		
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Количество стеблей, шт./растение	3,1 ± 0,34	3,1 ± 0,31	3,1 ± 0,31	3,4 ± 0,23	3,4 ± 0,29	3,4 ± 0,29
Диаметр стебля, мм	13,17 ± 1,21	20,1 ± 1,43	26,4 ± 1,82	14,04 ± 1,49	23,47 ± 2,03	28,86 ± 2,33
Высота стебля, см	152,5 ± 15,9	222,0 ± 33,1	334,3 ± 28,9	166,9 ± 19,1	263,5 ± 29,2	345,7 ± 37,7
Урожайность ивы, кг/га абс. сухого вещества	7 078	12 330	17 023	5 814	13 472	19 264

Количество стеблей растения в конце 1-го года роста первого трехлетнего периода роста составило 3,1 ± 0,34 шт./растение, 2-го и 3-го года роста – 3,1 ± 0,31 шт./растение.

Диаметр стебля растения в конце 1-го года первого трехлетнего периода роста в среднем составил 13,17 ± 1,21 мм, 2-го года – 20,1 ± 1,43 мм, 3-го года – 26,4 ± 1,82 мм. Максимальное утолщение диаметра стебля наблюдалось в июле, и за весь период наблюдения (2011–2013 гг.) составило в среднем 3,61 мм, принимая максимальное значение 4,6 мм в 2011 г.; минимальное в 2012 г. – 2,9 мм. К концу вегетационного периода утолщение стебля постепенно замедляется. В августе утолщение диаметра стебля по отношению к июлю замедлилось в 1,82 раза до 1,99 мм. В сентябре показатель утолщения стебля сохраняется примерно на уровне августа, а в октябре снижается до 0,22 мм.

К концу вегетационного периода 1-го года первого трехлетнего периода роста средняя высота и диаметр однолетних стеблей составили 152,5 ± 15,9 см и 13,7 ± 1,21 мм; к концу 2-го года роста высота и диаметр стебля увеличились на 69,5 см и 6,9 мм, что составило 222,0 ± 33,1 см и 20,1 ± 1,43 мм соответственно; к концу 3-го года роста высота и диаметр стебля увеличились на 121,3 см и 6,3 мм, достигнув 334,3 ± 28,9 см и 26,4 ± 1,82 мм соответственно.

Во втором трехлетнем периоде роста диаметр стебля однолетнего растения в среднем составил 14,04 ± 1,49 мм, к концу 2-го года увеличился в 1,67 раза, а в третьем году роста – в 1,23 раза по отношению ко 2-му году, что составило 23,47 ± 2,03 и 28,86 ± 2,33 мм соответственно. Высота стебля однолетнего растения составила 166,9 ± 19,1 см, к концу 2-го года увеличилась в 1,58 раза и в 1,31 раза к концу 3-го года роста, что составило 263,5 ± 29,2 и 345,7 ± 37,7 см соответственно.

За два трехлетних периода роста высота и диаметр стебля растения в конце 1-го года роста составили 159,70 ± 10,18 и 27,63 ± 1,74 мм; 2-го – 242,75 ± 29,34 и 21,79 ± 2,37 мм; 3-го – 340,00 ± 8,06 и 27,63 ± 1,74 мм. Среднегодовое утолщение стебля за два трехлетних периода роста составило 9,21 ± 3,67 мм, а увеличение высоты стебля – 113,33 ± 38,92 мм.

Наиболее высокий сезонный прирост надземной биомассы растения наблюдается в июле – 23,8 ± 8,5 г/растение. В мае–июне прирост в 2,29 раза ниже, чем в июле – 8,1 ± 6,0 г/растение. В августе прирост биомассы находился на относительно высоком по отношению к июлю уровне – 21,0 ± 6,0 г/растение. В сентябре прирост замедляется

в 2 раза по отношению к августу – $10,4 \pm 3,4$ г/растение. В конце вегетационного периода прирост практически прекратился и составил $0,2 \pm 0,1$ г/растение.

Сезонная динамика средней динамики прироста биомассы отдельных органов растения в течение вегетационного периода представлена на рисунке 1.

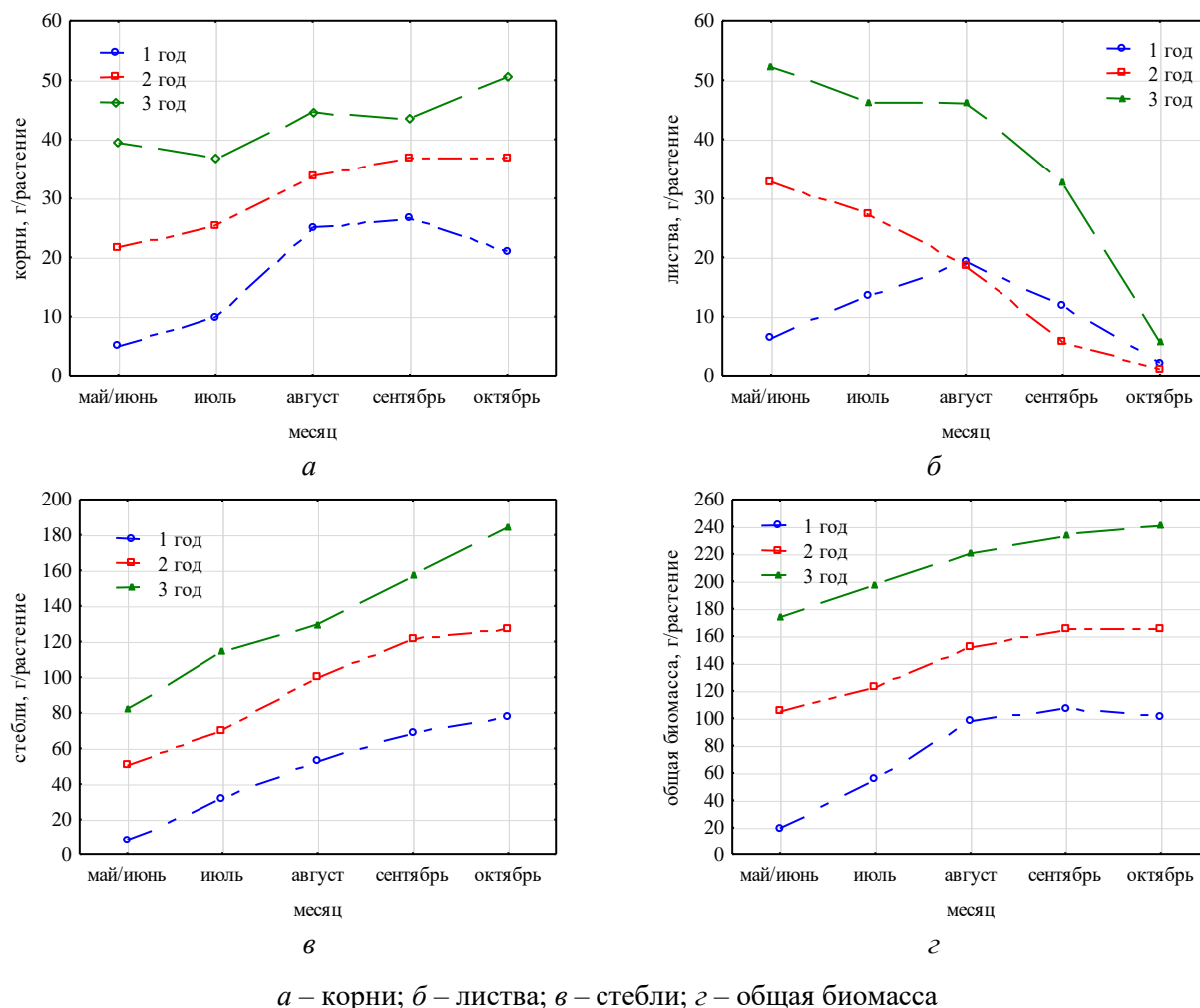


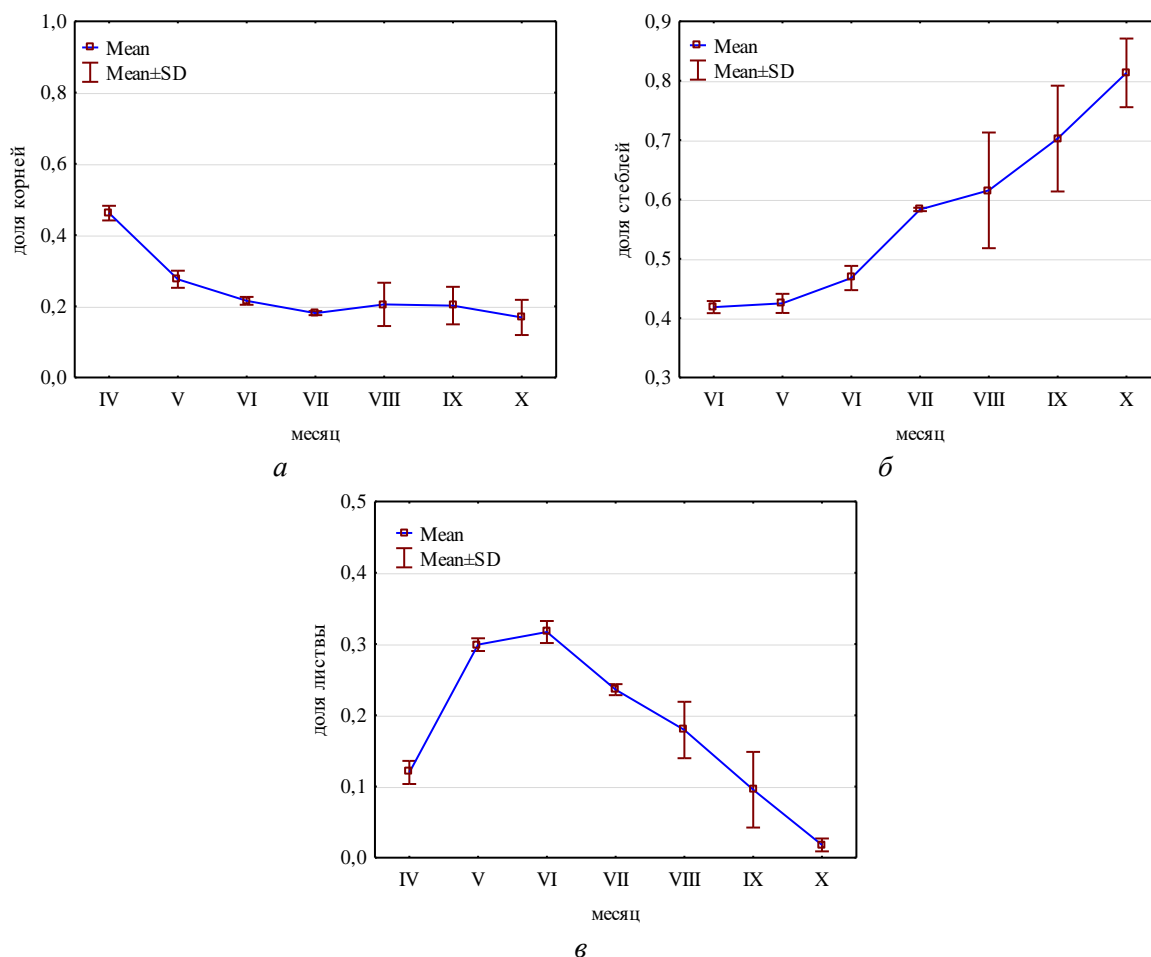
Рисунок 1 – Прирост биомассы *Salix alba* в течение вегетационного периода 2011–2013 гг.

Продуктивность надземной биомассы в среднем за два трехлетних периода роста к концу 1-го года роста составила $422,4 \pm 58,6$ г/растение; во 2-ом и 3-ем году – $868,1 \pm 85,3$ и $1\,188,6 \pm 103,8$ г/растение соответственно. В целом по результатам наблюдений урожайность ивы в конце 1-го года составила $6,45 \pm 0,89$ т/га абс. сух. вещества, 2-го и 3-го – $12,90 \pm 0,81$ т/га и $18,14 \pm 1,58$ т/га. соответственно. Прирост урожайности надземной биомассы *Salix alba* в конце 2-го и 3-го года составил $6,46 \pm 1,70$ и $5,24 \pm 0,78$ т/га абс. сух. вещества.

Доля биомассы корневой системы растения в среднем за период вегетации за первый трехлетний период наблюдения составила $0,24 \pm 0,10$, варьируя от 0,462 в начале до 0,169 в конце вегетационного периода. Доля листвы в общей биомассе растения принимает максимальное значение в мае–июне – $0,308 \pm 0,02$, минимальное значение в конце вегетации – $0,018 \pm 0,01$. С июля по октябрь наблюдается линейное снижение доли листвы в среднем на 0,075 в течение месяца. Доля биомассы стеблей в конце периода вегетации составила максимальное значение $0,813 \pm 0,03$; в апреле–июне минимальное – $0,437 \pm 0,03$. В среднем за месяц доля стеблей с мая по октябрь увеличивается на 0,086.

Максимальное увеличение доли биомассы стеблей наблюдается в мае–июне – 0,115, минимальное – в апреле – 0,006.

Доля биомассы отдельных органов растения в течение вегетационного периода за один трехлетний цикл с момента посадки представлена на рисунке 2.



а – корни; б – стебли; в – листья

Рисунок 2 – Доля биомассы органов *Salix alba* в течение вегетационного периода 2011–2013 гг.

Общая продуктивность биомассы *Salix alba* в конце 1-го года роста составила $160,6 \pm 10,4$ г/растение; 2-го года роста – $254,4 \pm 16,1$ г/растение; 3-го года роста – $424,8 \pm 23,1$. Продуктивность надземной биомассы растения в конце 1-го года роста составила $132,8 \pm 10,2$ г/растение; 2-го и 3-го года роста – $224,4 \pm 15,3$ и $234,0 \pm 19,0$ г/растение соответственно.

По результатам полевого эксперимента (2011–2013 гг.) содержание общего азота $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе ивы определено в конце вегетационного периода, которое в 1-й год роста составило $0,703 \pm 0,006$ %; 2-й и 3-й – $0,667 \pm 0,015$ и $0,640 \pm 0,010$ % соответственно. Содержание P_2O_5 в биомассе растения в 1-й год роста – $0,487 \pm 0,012$ %; 2-й и 3-й – $0,483 \pm 0,023$ и $0,480 \pm 0,010$ % соответственно.

При продуктивности сухой массы надземной биомассы за первый трехлетний период роста растения (2011–2013 гг.) накопление $N_{\text{общ}}$ в 1-й год роста составило

49,76 ± 0,42 кг/га, 2-й и 3-й – 82,24 ± 1,85 и 108,95 ± 1,70 кг/га соответственно. Накопленные фосфора растением в 1-й год роста составило 15,05 ± 0,37 кг/га; во 2-й и 3-й год – 26,00 ± 1,23 и 35,68 ± 0,47 кг/га соответственно.

По данным полевого эксперимента установлено влияние диаметра стебля *Salix alba* на его продуктивность (рисунок 3, а). Вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения представлено на рисунке 3, б.

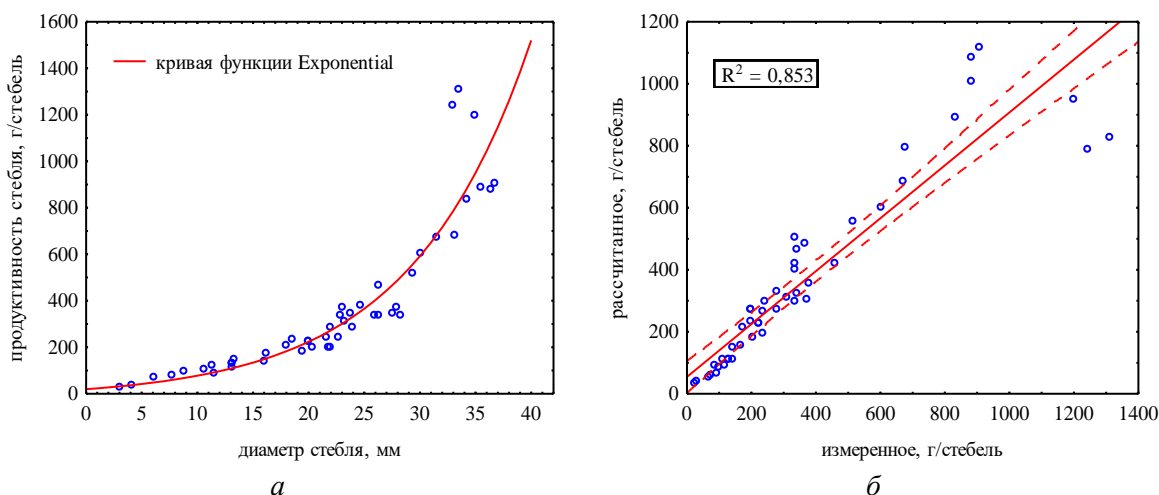


Рисунок 3 – Зависимость продуктивности стеблей *Salix alba* от их диаметра

Для расчета продуктивности стебля использована экспоненциальная функция (Exponential):

$$m_s = y_0 + A_1 e^{R_0 x}, \quad (1)$$

где m_s – масса стебля растения, г; y_0 – смещение кривой; A_1 – начальное значение кривой; R_0 – постоянная скорости роста кривой; x – диаметр стебля растения, мм.

Значения эмпирических коэффициентов функции (Exponential) для расчета продуктивности стебля представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Эмпирические коэффициенты функции (Exponential)

Коэффициент	y_0	A_1	R_0
	-18,173	38,028	0,093

Полученные результаты зависимости продуктивности стебля от его диаметра характеризуются высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий $t < 0 < t_{кр} = 1,7$; р-уровень – 0,49; коэффициент детерминации $R^2 = 0,853$. На основании вышепредставленных данных морфологических показателей и продуктивности *Salix alba*, полученных за два трехлетних периода роста (2011–2016 гг.) предложена формула для расчета общей урожайности надземной биомассы, т:

$$M_{н.б} = a \cdot \left(m_s + \frac{m_s}{\frac{f_{st}}{f_f}} \right) \cdot n_p \cdot n_{st} \cdot k_s \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где $a = 0,780$ – эмпирический коэффициент регрессии; n_p – количество растений, шт.; n_{st} – количество стеблей растения, шт./растение; k_s – коэффициент приживаемости растения; f_{st} – доля стеблей в общей биомассе растения; f_f – доля листвы в общей биомассе растения.

На основании общей урожайности надземной биомассы ивы, рассчитанной по формуле (2), и значений долей органов биомассы растения (рисунок 1) предложена формула для расчета урожайности подземной биомассы растения, т:

$$M_{n.б} = M_{n.б} \cdot \left(\frac{f_{st} + f_f}{f_r} \right), \quad (3)$$

где f_r – доля корней в общей биомассе растения.

Общая урожайность ивы рассчитывается по формуле:

$$M_{б} = M_{n.б} + M_{n.б}. \quad (4)$$

Уравнения 1–4 позволяют определить урожайность биомассы растения в течение всего вегетационного периода. Результаты моделирования урожайности надземной биомассы растения за два трехлетних периода роста, которые получены на основании морфологических характеристик, представлены на рисунке. 4.

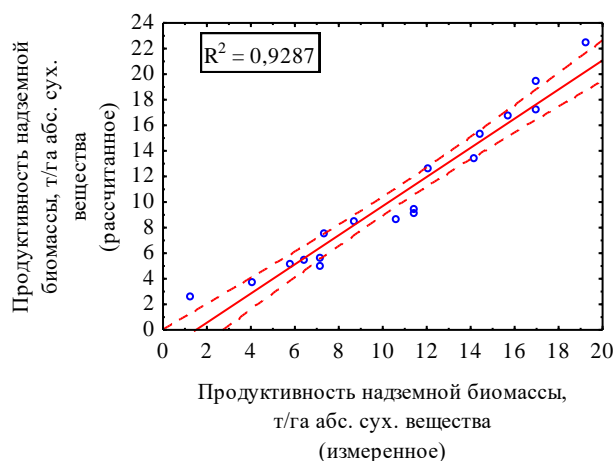


Рисунок 4 – Результаты моделирования урожайности надземной биомассы *Salix alba*

Полученные результаты зависимости урожайности растения от диаметра стебля характеризуются весьма высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий $t = 1,04 < t_{кр} = 1,76$; p -уровень – 0,157; коэффициент детерминации $R^2 = 0,929$. Средний модуль отклонений – 0,39 т/га, средний квадрат отклонений – 1,19 т/га, квадратный корень из среднеквадратической ошибки – 1,09 т/га, средняя абсолютная ошибка – 17,2 %.

Заключение

Обобщая вышепредставленные результаты исследований, констатируем, что сезонные морфологические данные можно использовать для упрощенного метода расчета урожайности ивы. Данный метод может быть востребован при составлении технико-экономического обоснования создания ивовых плантаций в качестве вегетационного

фільтра, а такжэ акумуляцыі N і P біомасой івы. Растэныя *Salix alba* могуць культывіравацца без дадатковага ўнесеньня мінеральных удобраньняў пры пасадке плантацыяў у паніжэнных месцах рэльефа на тэрыторыі водасбору, прадстаўленага пераважна пахотнымі землямі.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов, С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: аналитический обзор / С. А. Михайлов. – Барнаул : День, 2000. – 130 с.
2. Обзоры результативности экологической деятельности: Беларусь (третий обзор, сокращенная версия) / К. Ф. Бах [и др.]. – Нью-Йорк ; Женева : ООН, 2016. – 60 с.
3. Экологический доклад по стратегической экологической оценке по проекту «Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года» / И. Ф. Приходько [и др.]. – Минск : Респ. центр гос. экол. экспертизы и повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 2021. – 221 с.
4. Khan, F. I. An overview and analysis of site remediation technologies / F. I. Khan, T. Husain, R. Hejazi // Journal of environmental management. – 2004. – Vol. 71, nr 2. – P. 95–122.
5. Licht, L. A. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities / L. A. Licht, J. G. Isebrands // Biomass Bioenergy. – 2005. – Vol. 28. – P. 203–218.
6. Ali, H. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications / H. Ali, E. Khan, M. A. Sajad // Chemosphere. – 2013. – Vol. 91. – P. 869–881.
7. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements / Z. Fischerová [et al.] // Environ. Pollut. – 2006. – Vol. 144. – P. 93–100.
8. Meagher, R. B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants / R. B. Meagher // Curr. Opin. Plant Biol. – 2000. – Vol. 3. – P. 153–162.
9. Broadmeadow, S. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: A literature review of best management practice / S. Broadmeadow, T. R. Nisbet // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. – 2004. – Vol. 8. – P. 286–305.
10. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams / J. Turunen [et al.] // Sci. Total Environ. – 2019. – Vol. 649. – P. 495–503.
11. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics – a critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France / J-M. Dorioz [et al.] // Agric Ecosyst Environ. – 2006. – Vol. 117, nr 1. – P. 4–21.
12. Christen, B. Buffers for biomass production in temperate European agriculture: a review and synthesis on function, ecosystem services and implementation / B. Christen, T. Dalgaard // Biomass Bioenergy. – 2013. – Vol. 55. – P. 53–67.
13. Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Woody Plants with Deep-Planting Technique for the Potential Environmental Management of Carcass Burial Sites / K. Geonha [et al.] // Sustainability. – 2017. – Vol. 9, nr 1. – P. 155.
14. Greger, M. Use of willow in Phytoextraction / M. Greger, T. Landberg, // Int. J. Phytoremediat. – 1999. – Vol. 1, nr 2. – P. 115–123.
15. Neuschütz, C. Ability of various plant species to prevent leakage of N, P, and metals from sewage sludge / C. Neuschütz, M. Greger // Int. J. Phytoremediation. – 2009. – Vol. 12, nr 1. – P. 67–84.
16. An assessment of the multifunctionality of integrated buffer zones in northwestern Europe / D. Zak [et al.] // Environmental Quality. – 2019. – Vol. 48. – P. 362–375.

17. Potential efficiency of grassy or shrub willow buffer strips against nutrient runoff from soybean and corn fields in southern Quebec, Canada / L. Hénault-Ethier [et al.] // *Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 352–361.

18. Государственный реестр сортов / сост.: Т. В Семашко [и др.] ; науч. ред. В. А. Бейня. – Минск : Гос. инспекция по испытанию и охране сортов растений, 2017. – 225 с.

19. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.

20. Карманова, И. В. Математические методы изучения роста и продуктивности растений / И. В. Карманова. – М. : Наука, 1976. – 221 с.

21. Удобрения органические. Методы определения общего азота : ГОСТ 26715-85. – Введ. РБ 17.12.92. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. – 16 с.

22. Удобрения органические. Метод определения общего фосфора : ГОСТ 26715-85. – Введ. РБ 17.12.92. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. – 8 с.

REFERENCES

1. Mikhajlov, S. A. Diffuznoje zagriaznienije vodnoj ekosistemy. Mietody ocenki i matiematichieskije modeli: priedpolagajemyj obzor / S. A. Mikhajlov. – Barnaul : Dien', 2000. – 130 s.

2. Obzory riezul'tativnosti ekologichieskoj diejatel'nosti: Bielarus' (trietij obzor, sokrashchionnaja viersija) / K. F. Bakh [i dr.]. – N'ju-York ; Zhenieva : OON, 2016. – 60 s.

3. Ekologichieskij doklad po stratiegichieskoj ekologichieskoj ocenkie po projektu «Stratigii v oblasti okhrany okruzhajushchiej sriedy Riespubliki Bielarus' na pieriod do 2035 goda» / I. F. Prikhod'ko [i dr.]. – Minsk : Riesp. centr gos. ecol. ekspiertizy i povysheniya kvalifikacii rukovodiashchikh rabotnikov i spicialistov, 2021. – 221 s.

4. Khan, F. I. An overview and analysis of site remediation technologies / F. I. Khan, T. Husain, R. Hejazi // *Journal of environmental management*. – 2004. – Vol. 71, nr 2. – P. 95–122.

5. Licht, L. A. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities / L. A. Licht, J. G. Isebrands // *Biomass Bioenergy*. – 2005. – Vol. 28. – P. 203–218.

6. Ali, H. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications / H. Ali, E. Khan, M. A. Sajad // *Chemosphere*. – 2013. – Vol. 91. – P. 869–881.

7. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements / Z. Fischerová [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2006. – Vol. 144. – P. 93–100.

8. Meagher, R. B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants / R. B. Meagher // *Curr. Opin. Plant Biol.* – 2000. – Vol. 3. – P. 153–162.

9. Broadmeadow, S. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: A literature review of best management practice / S. Broadmeadow, T. R. Nisbet // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* – 2004. – Vol. 8. – P. 286–305.

10. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams / J. Turunen [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 649. – P. 495–503.

11. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics – a critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France / J-M. Dorioz [et al.] // *Agric Ecosyst Environ.* – 2006. – Vol. 117, nr 1. – P. 4–21.

12. Christen, B. Buffers for biomass production in temperate European agriculture: a review and synthesis on function, ecosystem services and implementation / B. Christen, T. Dalgaard // *Biomass Bioenergy*. – 2013. – Vol. 55. – P. 53–67.

13. Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Woody Plants with Deep-Planting Technique for the Potential Environmental Management of Carcass Burial Sites / K. Geonha [et al.] // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9, nr 1. – P. 155.
14. Greger, M. Use of willow in Phytoextraction / M. Greger, T. Landberg, // *Int. J. Phytoremediat.* – 1999. – Vol. 1, nr 2. – P. 115–123.
15. Neuschutz, C. Ability of various plant species to prevent leakage of N, P, and metals from sewage sludge / C. Neuschutz, M. Greger // *Int. J. Phytoremediation*. – 2009. – Vol. 12, nr 1. – P. 67–84.
16. An assessment of the multifunctionality of integrated buffer zones in northwestern Europe / D. Zak [et al.] // *Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 362–375.
17. Potential efficiency of grassy or shrub willow buffer strips against nutrient runoff from soybean and corn fields in southern Quebec, Canada / L. Hénault-Ethier [et al.] // *Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 352–361.
18. Gosudarstviennyj riejestr sortov / sost.: T. V. Siemashko [i dr.] ; nauch. ried. V. A. Biejnia. – Minsk : Gos. inspiekciya po ispytaniyu i okhranie sortov rastienij, 2017. – 225 s.
19. Dospiekhov, B. A. Mietodika polievogo opyta (s osnovami statistichieskoj obrabotki riezul'tatov issliedovaniy) / B. A. Dospiekhov. – 5-je izd., dop. i pierierab. – M. : Agropromizdat, 1985. – 351 s.
20. Karmanova, I. V. Matematichieskije mietody izuchienija rosta i produktivnosti rastienij / I. V. Karmanova. – M. : Nauka, 1976. – 221 s.
21. Udobrienija organichieskije. Mietody opriedielienija obshchiego azota : GOST 26715-85. – Vvied. RB 17.12.92. – Minsk : Belorus. gos. in-t standartizacii i siertifikacii, 1987. – 16 s.
22. Udobrienija organichieskije. Mietod opriedielienija obshchiego fosfora : GOST 26715-85. – Vvied. RB 17.12.92. – Minsk : Belorus. gos. in-t standartizacii i siertifikacii, 1987. – 8 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 15.02.2023

УДК 631.811.982

**Виктор Трофимович Демянчик¹, Михаил Александрович Лукьянчик²,
Виктор Викторович Демянчик³**

¹канд. биол. наук, доц., зав. лаб. оптимизации экосистем
Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси

²студент 4-го курса факультета естествознания
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

³науч. сотрудник лаб. биогеохимии
Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси

Victar T. Dziamianchyk¹, Mihail Lukyanchik², Victar V. Dziamianchyk³

¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Head of the Ecosystem Optimization Laboratory of Polesie Agrarian Ecological Institute
of National Academy of Sciences of Belarus

²4-th Year Student of the Faculty of Natural Sciences
of Brest State A. S. Pushkin University

³Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry
of Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus

e-mail: koktebel.by@mail.ru

ОРНИТОФАУНА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОЙ ЗИМОВКИ 2022/2023 гг. В ГОРОДЕ БРЕСТЕ (БЕЛАРУСЬ)

Птицы в условиях теплой зимовки 2022/2023 гг. в г. Бресте (Беларусь) характеризовались повышенным видовым богатством (90 видов); преобладанием единично регистрируемых видов (34,4 % среди 7 статусов численности); преобладанием эвритопных видов (27,7 %); сравнительно низкой численностью разовых (одномоментных) скоплений массово зимующих видов; отсутствием на зимовке 6 видов птиц – обитателей древесных стаций, которые и в прошлые годы регулярно зимовали. По имеющимся литературным данным, среди городов Беларуси и других стран Брест в последние 3 года по-прежнему выделяется одним из самых высоких значений видового богатства зимующих птиц – 116 видов, что составляет 42 % от всех видов птиц Бреста и 71 % от всех зимующих видов птиц Беларуси.

Ключевые слова: орнитофауна, зимовка, г. Брест, изменение климата.

Avifauna under Warm Wintering Conditions 2022/2023 in the City of Brest

Birds in warm wintering conditions 2022/2023 in Brest (Belarus) were characterized by increased species richness (90 species); the predominance of singly recorded species (34,4 % among 7 abundance statuses); the predominance of eurytopic species (27,7 %); a relatively low number of one-time (single) accumulations of massively wintering species; the absence of 6 species of birds in the wintering habitats of tree habitats and which in past years regularly hibernated. According to available literature data, among the cities of Belarus and other countries, Brest, in the last 3 years, is still distinguished by one of the highest species richness of wintering birds: 116 species, which is 42 % of all bird species of Brest and 71 % of all wintering birds species of birds in Belarus.

Key words: avifauna, wintering, Brest, climate change.

Введение

Среди крупных городов Беларуси и Белорусского Полесья Брест выделяется наиболее благоприятными экологическими условиями для зимовки представителей орнитофауны различных стациальных (биотопических) комплексов, что обусловлено широким спектром естественных и антропогенных местообитаний, доступностью и многообразием кормов и другими факторами [1–3]. Представляется актуальным оценить видовой состав, относительную численность и стациальное распределение птиц, обитавших в Бресте в течение одной из самых теплых зим – 2022/2023 гг.

Матеріалы і метады

Целенаправленныя рэгулярныя даследаванні зімуючай орнітофауны Брэста на 7 стасіонарах выкананы ў 2010–2023 гг. Зімой 2022/2023 гг. найбольш інтэнсіўныя ўчыты птуц прыводзіліся адрэдна на 3 ўчытных плошчадках ў расчэтно-планіравочных раёнах (РПР): Цэнтр, Ковалева, Кіевка. С перыядычнасцю не рэжэ 1 разо ў 3 дня і 1 разо ў 6 днэй маршрутныя ўчыты прыводзіліся, саотвэтствэнна, на ўсех астальных многалетніх стасіонарах і ўсех 16 РПР Брэста [1]. За ісклученнем некотарых ўчыткаў пагранічнай палосы поймы р. Западны Буг, зімуючая орнітофауна г. Брэста ісследована абследована (па нашым прадставленням) адносітэльна полно. Учыты прыводзіліся на пастаянных плошчадках наблідэнняў і ўчытных маршрутах ў ўсех тыпах стасій Брэста [1]. Для абых абсалютных ацэнак прынята прагрэссыруючая шкала чысленнасці па чыслу пар, асобей, колоніяў і т. д. па сямі стасісам:

- 1) адінчыный (ед.): 1–4 пары, асобей, колоніяў;
- 2) ачынь рэдкы (ор.): 5–10;
- 3) рэдкы (ред.): 11–30;
- 4) малочысленны (мал.): 31–90;
- 5) абычны (об.): 91–200;
- 6) многочысленны (мн.): 201–400;
- 7) масовы, ачынь многочысленны (мас.): свыше 400 [1].

Па стасіальнаму стасісу (характэру ўстойчывых месцаобітаніяў) птуцы распрэделены па пяці тыпам стасій: дрэвесныя (др.), луговыя (луг.), мінеральныя (мін.), водныя (вод.), тэхнічыскыя (тэх.). Ёсці зарэгістраваны на зімовкэ від быў ўстойчыво сьвязан с трэма і большым чыслом стасій, тагда он абозначался стасісам – эврітопны (эвр.). Усего ў зімны перыяд 2022/2023 гг. с 1 дэкабры па 28 фэвраля ў Брэсте зарэгістравано 90 відов птуц. Для сраўнення іспользованы фондowyя данныя за прошлыя годы і літэратурныя сьведэня па зімуючай орнітофауне аддэльных горадов лэснай зоны Евразыі.

Усе зімуючыя віды птуц зарэгістраваны фотоапаратамі Nicon с 83-кратным ўзвэлчычэннем. Адінствэннае ісклучэньне – рэгістрацыя па голасам і візуальна журавля сегога *Grus grus*.

Асновная часть

Горад Брэст – адін із крупнейшых горадов Белорусскаго Полесья: плошчадь – 145 км², 348 тыс. жытэлей [1]. В последние дэсяцілетя клімат Белорусскаго Полесья характэрызавался потэпленнем, пры этом в последнее дэсяцілетіе прызашел перэход с зімнаго потэплення на лэтнее потэпленне [4]. Зімныя сэзоны ў Брэсте ў этот перыяд в цэлом саотвэтствэвалі рэгіональнаму кліматчыскаму трэндэ. Пры этом на фоне сраўнітэльна тэплой погоды с многочысленнымы перэходамы суточных тэмператур въздуха чэрэз ноль абычно в канце зімы прызавляліся многоснежэе і ўстойчывыя морозы. «Сыльныя» для Брэста морозы –9 °С і нжыжэ, которыя атмечалыся в тэчэньне нескількых суток подряд, в последние зімы былі адносітэльна рэдкымы.

Зімны сэзон 2022/2023 гг. в цэлом быў ещэ более тэплым. Найболее «суровой» была вторая дэкада дэкабры с ўстойчывым снэжным покровом і стабільной отрицатэльной тэмпературой –1...–6 °С. Самы сыльны за всю последнюю зіму мороз в РПР Цэнтр (–10 °С) продержался всего двое суток – 17–19 дэкабры. В дальнейшем наступыла продолжытэльная оттепель с рэкордным потэпленнем 01.01.2023, когда въздух прогрелся в Цэнтре до +15 °С, а на сонэчнай экспозыцыі – до +18 °С і выше. Промерзаныя почвы в 2022/2023 гг. на ўчытных плошчадках не прывышало 3–10 см, хотя в оддэльныя зімы после 2010 г. достыгало 1,2 м. Фауныстычыскаыя отклық на зімнее сущэствэнное потэпленне атмечэны срдэі ўсех груп зімоспячэй фауны Брэста, вклучая рэгулярныя

кормовые вылеты летучих мышей *Vespertilionidae*, для которых характерна стабильная гибернация: вечерница рыжая *Nyctalus noctula* и нетопырь средиземноморский *Pipistrellus kuhlii*. Результаты учетов, птиц зимующих в черте Бреста, показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Видовой состав и статусы птиц, зимующих в Бресте в 2022/2023 гг.

№ п/п	Виды птиц	Статусы* численности и охраны	Тип станций
1.	Гагара чернозобая <i>Gavia arctica</i>	ед. охр.**	вод.
2.	Гоголь обыкновенный <i>Vucephala clangula</i>	мал.	вод.
3.	Поганка малая <i>Tachybaptus ruficollis</i>	ед.	вод.
4.	Поганка большая <i>Podiceps cristatus</i>	ед.	вод.
5.	Гусь белолобый <i>Anser albifrons</i>	ед.	вод., луг.
6.	Гусь серый <i>Anser anser</i>	ед.	вод., луг.
7.	Гуменник <i>Anser fabalis</i>	ед.	вод., луг.
8.	Кряква <i>Anas platyrhynchos</i>	мас.	вод., луг.
9.	Крохаль большой <i>Mergus merganser.</i>	ред. охр.	вод.
10.	Крохаль длинноносый <i>Mergus serrator</i>	ед. охр.	вод.
11.	Луток <i>Megrellus albellus</i>	ед. охр.	вод.
12.	Лебедь-шипун <i>Cygnus olor</i>	об.	вод., луг.
13.	Синьга <i>Melanitta nigra</i>	ед.	вод.
14.	Турпан обыкновенный <i>Melanitta fusca</i>	ед.	вод.
15.	Свиязь <i>Mareca penelope</i>	ед.	вод., луг.
16.	Утка серая <i>Mareca strepera</i>	ед.	вод., луг.
17.	Чернеть хохлатая <i>Aythya fuligula</i>	ед.	вод.
18.	Чернеть морская <i>Aythya marila</i>	ед.	вод.
19.	Шилохвость <i>Anas acuta</i>	ед., охр.	вод., луг.
20.	Нырок красноголовый <i>Aythya ferina</i>	ед.	вод.
21.	Куропатка серая <i>Perdix perdix</i>	мал.	луг., др.
22.	Фазан <i>Phasianus colchicus</i>	мал.	эвр.
23.	Журавль серый <i>Grus grus</i>	ед.	луг.
24.	Цапля большая белая <i>Casmerodius albus</i>	ед.	вод., луг.
25.	Цапля серая <i>Ardea cinerea</i>	ор.	эвр.
26.	Баклан большой <i>Phalacrocorax carbo</i>	мал.	вод., др.
27.	Зимняк <i>Buteo lagopus</i>	ед.	луг., др.
28.	Канюк обыкновенный <i>Buteo buteo</i>	ор.	луг., др.
29.	Орлан-белохвост <i>Haliaeetus albicilla</i>	ед., охр.	эвр.
30.	Перепелятник <i>Accipiter nisus</i>	мал.	эвр.
31.	Тетеревятник <i>Accipiter gentilis</i>	ред.	эвр.
32.	Пустельга обыкновенная <i>Falco tinnunculus</i>	ор. охр.	эвр.
33.	Сапсан <i>Falco peregrinus</i>	ед. охр.	эвр.
34.	Камышница <i>Gallinula chloropus</i>	ор.	вод.
35.	Лысуха <i>Fulica atra</i>	ред.	вод., луг.
36.	Чибис <i>Vanellus vanellus</i>	об.	луг.
37.	Чайка озёрная <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	ред.	эвр.
38.	Чайка серебристая <i>Larus argentatus</i>	мал.	эвр.
39.	Чайка сизая <i>Larus canus</i>	ред. охр.	эвр.
40.	Хохотунья <i>Larus cachinnans</i>	ор.	эвр.
41.	Голубь сизый <i>Columba livia</i>	мас.	эвр.
42.	Горлица кольчатая <i>Streptopelia decaocto</i>	об.	эвр.
43.	Филин <i>Bubo bubo</i>	ед. охр.	эвр.

Окончание таблицы 1

44.	Неясыть серая <i>Strix aluco</i>	ед.	др., тех.
45.	Сова ушастая <i>Asio otus</i>	ред.	др., луг.
46.	Зимородок обыкновенный <i>Alcedo atthis</i>	ред. охр.	вод., др.
47.	Дятел белоспинный <i>Dendrocopos leucotos</i>	ед. охр.	др.
48.	Дятел зелёный <i>Picus viridis</i>	ед. охр.	др.
49.	Дятел малый <i>Picoides minor</i>	ор.	др.
50.	Дятел пёстрый <i>Dendrocopos major</i>	мн.	др.
51.	Дятел сирийский <i>Dendrocopos syriacus</i>	об.	др., тех.
52.	Дятел средний <i>Dendrocopos medius</i>	ор.	др.
53.	Желна <i>Dryocopus martius</i>	ред.	др.
54.	Жаворонок хохлатый <i>Galerida cristata</i>	ед. охр.	луг., мин.
55.	Жаворонок полевой <i>Alauda arvensis</i>	мас.	луг.
56.	Свиристель <i>Bombycilla garrulus</i>	мн.	др., тех.
57.	Крапивник <i>Troglodytes troglodytes</i>	об.	эвр.
58.	Зарянка <i>Erithacus rubecula</i>	ред.	др., тех.
59.	Рябинник <i>Turdus pilaris</i>	мн.	эвр.
60.	Дрозд чёрный <i>Turdus merula</i>	об.	эвр.
61.	Белобровик <i>Turdus iliacus</i>	ед.	др., луг.
62.	Деряба <i>Turdus viscivorus</i>	ед.	др., луг.
63.	Королёк жёлтоголовый <i>Regulus regulus</i>	об.	др.
64.	Синица усатая <i>Panurus biarmicus</i>	ед. охр.	вод., луг.
65.	Синица длиннохвостая <i>Aegithalos caudatus</i>	об.	др.
66.	Гаичка черноголовая <i>Parus palustris</i>	об.	др.
67.	Гаичка буроголовая, <i>Parus montanus</i>	об.	др., тех.
68.	Синица хохлатая <i>Lophophanes cristatus</i>	мал.	др.
69.	Московка <i>Periparus ater</i>	мал.	др.
70.	Лазоревка обыкновенная <i>Cyanistes caeruleus</i>	мас.	эвр.
71.	Синица большая <i>Parus major</i>	мас.	эвр.
72.	Поползень обыкновенный <i>Sitta europaea</i>	мал.	др.
73.	Пищуха обыкновенная <i>Certhia familiaris</i>	мал.	др.
74.	Сорокопуд серый <i>Lanius excubitor</i>	ед.	др., луг.
75.	Сойка <i>Garrulus glandarius</i>	об.	эвр.
76.	Сорока <i>Pica pica</i>	об.	эвр.
77.	Галка <i>Corvus monedula</i>	мас.	эвр.
78.	Грач <i>Corvus frugilegus</i>	мас.	эвр.
79.	Ворона серая <i>Corvus cornix</i>	мн.	эвр.
80.	Ворон <i>Corvus corax</i>	мал.	эвр.
81.	Скворец обыкновенный <i>Sturnus vulgaris</i>	об.	эвр.
81.	Скворец обыкновенный <i>Sturnus vulgaris</i>	мас.	луг.
82.	Воробей домовый <i>Passer domesticus</i>	мн.	эвр.
83.	Воробей полевой <i>Passer montanus</i>	мас.	эвр.
84.	Зеленушка обыкновенная <i>Chloris chloris</i>	мн.	эвр.
85.	Чиж <i>Spinus spinus</i>	мас.	эвр.
86.	Щегол черноголовый <i>Carduelis carduelis</i>	об.	эвр.
87.	Снегирь обыкновенный <i>Pyrrhula pyrrhula</i>	об.	эвр.
88.	Дубонос обыкновенный <i>Coccothraustes coccothraustes</i>	ред.	др., тех.
89.	Просянка <i>Miliaria calandra</i>	ед. охр.	луг., тех.
90.	Овсянка обыкновенная <i>Emberiza citrinella</i>	об.	эвр.

Примечание – * – Обозначение статусов показано в разделе «Материалы и методы», охр** – виды, включенные в Красную книгу Республики Беларусь; полужирным шрифтом обозначены виды первой массовой волны весенней миграции (со 2-й декады февраля 2023 г.).

В составе орнитофауны Бреста по состоянию на 2019 г. зарегистрирован 261 вид [2]. В ходе полной инвентаризации в 2010 – первой половине 2023 г. в городской черте отмечено 274 видов птиц.

В результате обобщения учетных данных на зимовке 2022/2023 гг. установлено обитание 90 видов птиц (таблица 1).

В их число включены три вида первой волны весенней миграции: *Vanellus vanellus*, *Galerida cristata*, *Alauda arvensis*, – особи которых в разном числе регистрировались на типичных зимовках Бреста и в предыдущие годы.

По характеру местообитаний в станциях Бреста преобладали эвритопные птицы – 27,7 %. Птицы других мест, соответственно, составляли: 23,6 % – древесные, 21,8 % – водные, 20,2 % – луговые, 5,8 % – технические, 0,9 % – минеральные станции.

По численности зимующие виды на 34,4 % были представлены единичными, 17,8 % – обычными, 11,2 % – редкими, 12,2 % – малочисленными, 11,2 % – массовыми, 6,6 % – многочисленными, 6,6 % – очень редкими.

В данную зимовку в Бресте не отмечены ранее сравнительно регулярно зимующие виды: чечетки *Acanthis sp.*, коноплянка *Linaria cannabina*, клест-еловик *Loxia curvirostra*, зяблик *Fringilla coelebs*, дятел седой *Picus canus* и некоторые другие.

Разовые скопления врановых, гусеобразных, воробьинообразных по сравнению с прошлыми зимовками не выделялись рекордно высокими показателями численности.

Например, самое многочисленное одномоментное скопление кряквы в Бресте из 7 105 особей на площади всего 0,67 га акватории р. Мухавец в РПП Вычулки и Красный двор отмечено 27.12.2021 г. [1].

В зимовку 2022/2023 гг. для кряквы этот показатель составил 334 особи на 1 га акватории в Центре.

Наиболее многочисленное одномоментное скопление врановых птиц в последнюю зимовку в ходе фоторегистраций отмечено после наступления резкой оттепели и составило 22–24 тыс. особей в стае галки и грача на вечернем пролете под Киевкой.

Но и в этом случае более чем вдвое многочисленные стаи врановых были отмечены в прошлые зимовки [8].

По статусу численности, особенно в центральных РПП города, более низкий ранг по сравнению с прошлыми зимовками продемонстрировали свиристель, снегирь, дубонос, скворец, кряква, лебедь-шипун, зарянка и ряд других.

Среди зимующих видов птиц в Бресте отмечено 17 представителей орнитофауны, включенных в Красную книгу Республики Беларусь (таблица 1).

За последние три года на зимовках в Бресте отмечено 116 видов птиц, причем последняя зимовка отличалась наибольшим числом зарегистрированных птиц.

Зимовка птиц 2022/2023 гг. характеризовалась сравнительно богатым составом – 90 видов.

По состоянию на 1950–2017 гг. в Беларуси было известно 320 видов птиц (163 вида (51 %) отмечались в этот период и на зимовках [5]).

В 2010 – первой половине 2023 г. в Бресте известно 274 вида птиц, в т. ч. на последних трех зимовках отмечено 116 видов (42 %) (наши данные).

Брест характеризуется сравнительно высоким видовым богатством зимующих птиц, в последние три зимовки в городе отмечено 71 % от всех зимующих видов птиц Беларуси.

В этом отношении также показательны данные таблицы 2, где приведены сведения о числе зарегистрированных видов птиц разных городов не по одному сезону, а в течение трех и более зимних периодов [6–11].

Таблица 2 – Сравнительная оценка числа зимующих видов птиц в городах Беларуси и других стран на основании трех и более учетных сезонов

Город, страна	Число зимующих видов [источник]	Город, страна	Число зимующих видов [источник]
Брест, Беларусь	116 (наши данные)	Ижевск, Россия	44 [6]
Кельце, Польша	112 [11]	Гомель, Беларусь	46 [9]
Иркутск, Россия	73 [6]	Витебск, Беларусь	35 [10]
Воронеж, Россия	61 [6]	Тверь, Россия	27 [6]
Новосибирск, Россия	60 [6]	Полоцк, Беларусь	22 [7]
Архангельск, Россия	55 [6]	Омск, Россия	12 [6]

Как показано в таблице 2, в Бресте по сравнению с другими городами, также не входящими в ареал регулярных зимовок водоплавающих и многих других перелетных птиц, представлено сравнительно большое число зимующих видов. Особенно заметно различие по сравнению с другими городами Беларуси (таблица 2).

В зимний период 2022/2023 гг. наиболее богатым видовым составом зимующих птиц характеризовалась речная акватория в центральных, часто посещаемых людьми местах Бреста. Хотя ночевки антропофобных и многих других птиц проходили главным образом на «заповедной» западной окраине города. На центральногородской акватории впервые за весь период исследований регулярно появлялись гуси – гуменник и белолобый.

Заключение

Таким образом, птицы в условиях теплой зимовки 2022/2023 гг. в Бресте характеризовались повышенным видовым богатством (90 видов); преобладанием единично регистрируемых видов (34,4 % среди семи статусов численности); преобладанием эвритопных видов (27,7 %); сравнительно низкой численностью разовых (одномоментных) скоплений массово зимующих видов; отсутствием на зимовке шести видов птиц – обитателей древесных стаций, которые и в прошлые годы регулярно зимовали. По имеющимся литературным данным, среди городов Беларуси и других стран Брест в последние три года, по-прежнему выделяется одним из самых высоких значений видового богатства зимующих птиц: 116 видов, что составляет 42 % от всех видов птиц Бреста и 71 % от всех зимующих видов птиц Беларуси.

Выражаем благодарность за содействие в учетах и подготовке рукописи М. Г. Демянчик, В. П. Рабчуку, А. Г. Ливошко, О. С. Гроде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Птицы Бреста: общие сведения / В. Т. Демянчик [и др.]. – Брест : БрГУ, 2022. – 210 с.
2. Демянчик, В. Т. Птицы / В. Т. Демянчик // Брест. Брэст. Brest. 1000 / сост. А. Н. Вабищевич. – Минск : Беларус. Энцыкл. імя Пётруся Броўкі, 2019. – С. 151–152.
3. Демянчик В. В. Появление регионально новых видов и популяционных группировок тетрапод в белорусско-польском пограничье / В. Т. Демянчик // Туристический и природный потенциал водных объектов белорусско-польского пограничья : материалы науч.-практ. конф., Брест, 30–31 окт. 2020 г. / под ред. Н. В. Михальчука. – Брест : Альтернатива, 2021. – С. 51–53.
4. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
5. Никифоров, М. Е. Региональные списки видов птиц и иммиграционный орнитофауногенез / М. Е. Никифоров, И. Э. Самусенко // Актуальные проблемы зоологической науки в Беларуси : сб. ст. XI зоол. междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 10-летию

- основания ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам», Минск, 1–3 нояб. 2017 г. : в 2 т. / редкол.: О. И. Бородин [и др.]. – Минск : Изд. А. Н. Вараксин, 2017. – Т. 1. – С. 275–293.
6. Птицы городов России / ред. В. М. Храбрый. – СПб. ; М., 2012. – 513 с.
7. Соколов, Л. В. Зимующие птицы Полоцка и его окрестностей / Л. В. Соколов, А. А. Соколова, В. Н. Харин // Рус. орнитол. журн. – 2021. – Т. 30. – С. 2055–2059.
8. Распространение и тренды численности врановых Corvidae селитебных территорий Брестской области / В. В. Демяничик [и др.] // Природнае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы разіцця. – 2020. – № 12. – С. 65–71.
9. Горошко, З. А. Зимняя авифауна города Гомеля / З. А. Горошко, А. Н. Кусенков // Актуальные проблемы экологии : материалы VII междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 26–28 окт. 2010 г. – Гродно : ГрГМУ, 2011. – С. 70–72.
10. Кузьменко, В. В. Орнитофауна г. Витебска в системе биоразнообразия Белорусского Поозерья / В. В. Кузьменко, В. Я. Кузьменко // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та імя П. М. Машэрава. – 2012. – № 1 (67). – С. 35–46.
11. Ptaki zimujące Kielc w latach 2000–2014 / P. Wilniewicz [i in.] // Naturalia. – 2015. – № 4. – S. 3–78.

REFERENCES

1. Pticy Briesta: obshchije sviedienija / V. T. Diemianchik [i dr.]. – Brest : BrGU, 2022. – 210 s.
2. Diemianchik, V. T. Pticy / V. T. Diemianchik // Брест. Брэст. Briest. 1000 / sost. A. N. Vabishchievich. – Minsk : Bielarus. Encykl. imia Pietrusia Brouki, 2019. – S. 151–152.
3. Diemianchik, V. V. Pojavlienije riegional’no novykh vidov i populacionnykh grup-pirovok tietrapod v bielorusko-pol’skom pogranichje / V. V. Diemianchik / Turistichieskij i prirodnyj potencial vodnykh objektov bielorusko-pol’skogo pogranichja : matierialy nauch.-prakt. konf., Brest, 30–31 okt. 2020 g. / pod ried. N. V. Mihal’chuka. – Brest : Al’ternativa, 2021. – S. 51–53.
4. Loginov, V. F. Izmienienije klimata Bielarusi: prichiny, posledstvija, vozmozhnosti riegulirovanija / V. F. Loginov, S. A. Lysienko, V. I. Miel’nik. – Minsk : Enciklopediks, 2020. – 264 s.
5. Nikiforov, M. Ye. Riegional’nyje spiski vidov ptic i immigracionnyj ornitofaunogenez / M. Ye. Nikiforov, I. Ye. Samusienko // Aktual’nyje probliemy zoologichieskoj nauki v Bielarusi : sb. st. XI zool. miezhdunar. nauch.-prakt. konf., priuroch. k 10-lietiju osnovanija GNPO «NPC NAN Bielarusi po bioriesursam», Minsk, 1–3 nojab. 2017 g. : v 2 t. / riedkol.: O. I. Borodin [i dr.]. – Minsk : Izd. A. N. Varaksin, 2017. – Т. 1. – S. 275–293.
6. Pticy gorodov Rossii / ried. V. M. Khrabryj. – SPb. ; M., 2012. – 513 s.
7. Sokolov, L. V. Zimujushchije pticy Polocka i jego okriestnostiej / L. V. Sokolov, A. A. Sokolova, V. N. Kharin // Rus. ornitol. zhurn. – 2021. – Т. 30. – S. 2055–2059.
8. Rasprostranienije i trendy chisliennosti vranovyh Corvidae sielitebnykh tierritorij Briestsoj oblasti / V. V. Diemianchik [i dr.] // Pryrodnaje asiaroddzie Paliessia: asablivasci i pierspiektyvy razvicia. – 2020. – № 12. – S. 65–71.
9. Goroshko Z. A. Zimniaja avifauna goroda Gomielia / Z. A. Goroshko, A. N. Kusienkov // Aktual’nyje probliemy ekologii : matierialy VII miezhdunar. nauch.-prakt. konf., Grodno, 26–28 okt. 2010 g. – Grodno : GrGMU, 2011. – S. 70–72.
10. Kuz’mienko, V. V. Ornitofauna g. Vitebska v sistiemie bioraznoobrazija Bieloruskogo Poozier’ja / V. V. Kuz’mienko, V. Ya. Kuz’mienko // Viesn. Vicieb. dziarzh. un-ta imia P. M. Masherava. – 2012. – № 1 (67). – S. 35–46.
11. Ptaki zimujące Kielc w latach 2000–2014 / P. Wilniewicz [i in.] // Naturalia. – 2015. – № 4. – S. 3–78.

УДК 556.531.5:574.633(476.5)

**Екатерина Иосифовна Кацнельсон¹, Лилия Сергеевна Беляева²,
Валерия Васильевна Курчанова³, Янина Дмитриевна Гузова⁴**

¹ст. преподаватель каф. химии и естественнонаучного образования
Витебского государственного университета имени П. М. Машерова

²магистрант 1-го курса факультета химико-биологических и географических наук
Витебского государственного университета имени П. М. Машерова

³студент 4-го курса факультета химико-биологических и географических наук
Витебского государственного университета имени П. М. Машерова

⁴студентка 3-го курса факультета химико-биологических и географических наук
Витебского государственного университета имени П. М. Машерова

Ekateryna Katsnelson¹, Lilia Belyaeva², Valeria Kurchanova³, Yanina Guzova⁴

¹Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Natural Science Education
of Vitebsk State University named after P. M. Masherov

²1-st Year Master's Student of the Faculty of Chemical, Biological and Geographical Sciences
of Vitebsk State University named after P. M. Masherov

³4-th Year Student of the Faculty of Chemical, Biological and Geographical Sciences
of Vitebsk State University named after P. M. Masherov

⁴3-d Year Student of the Faculty of Chemical, Biological and Geographical Sciences
of Vitebsk State University named after P. M. Masherov

e-mail: kate_kaznelson@tut.by

ИНДИКАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТИ ПО БИОТИЧЕСКОМУ ИНДЕКСУ

Возрастающая антропогенная нагрузка на пресные водоемы становится все более острой экологической и социальной проблемой. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы разработки достаточно простых и информативных методов биоиндикации ее воздействия на биоту водоемов, которые возможно применить в мониторинговых и серийных эколотоксикологических исследованиях. Для биологической индикации качества вод могут быть использованы практически все группы организмов, которые населяют водоемы: планктонные и бентосные беспозвоночные, простейшие, водоросли, макрофиты, бактерии и рыбы. Каждая из этих групп, выступая в роли биологического индикатора, имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют границы ее использования при решении задач биоиндикации. Материалы, изложенные в статье, могут являться информационной базой для экологического мониторинга водоемов Витебской области.

Ключевые слова: природные водные экосистемы, биотический индекс, процессы самоочищения воды, экологический статус, индикация природных водоемов.

Indication of Natural Water Bodies in Vitebsk Region According to the Biotic Index

Increasing anthropogenic pressure on fresh water bodies is becoming an increasingly acute environmental and social problem. In this connection the issues of development of simple and informative methods of bioindication of its impact on the biota of water bodies, which can be applied in monitoring and serial ecological and toxicological studies, are of particular relevance. Practically all groups of organisms that inhabit water bodies can be used for biological indication of water quality: planktonic and benthic invertebrates, protozoa, algae, macrophytes, bacteria and fish. Each of these groups, acting as a biological indicator, has its own advantages and disadvantages, which determine the limits of its use in solving the problems of bioindication. The materials presented in the article can be an information base for ecological monitoring of water bodies of Vitebsk region.

Key words: natural aquatic ecosystems, biotic index, water self-purification processes, ecological status, indication of natural water bodies.

Введение

Водные экосистемы представляют собой естественную водную среду, в которой живые и неживые составляющие связаны в единое функциональное целое обменом веществ и энергии, что сопровождается трансформацией веществ под взаимодействием

ряда физических, химических и биологических факторов [1]. Загрязнение водной среды, наряду с дефицитом пресной воды, является глобальной экологической проблемой. В водоемах увеличивается содержание веществ антропогенного происхождения, токсичность которых для большинства водных организмов проявляется уже в малых концентрациях [2].

Витебская область характеризуется высокой степенью хозяйственного освоения и промышленного развития. Население области насчитывает более 1 млн человек, проживающих на площади 40 тыс. км². Город Витебск является одним из крупнейших промышленных центров Республике Беларусь. Все это в совокупности обуславливает значительное антропогенное воздействие на природные экосистемы.

Располагаясь на территории с благоприятными условиями увлажнения, Витебская область обладает хорошо развитой гидрографической сетью, представленной бассейном Западной Двины с ее многочисленными притоками, и более чем 2 000 озерами. Водные экосистемы отличаются динамичностью во времени, территориальной замкнутостью в границах водосборных объектов, отражают интегральное влияние всех происходящих в гидрографической сети и на водосборах естественных и антропогенных процессов. Являясь основными приемниками сточных вод различных категорий, водные объекты выступают индикаторами экологического состояния и позволяют судить о чрезмерном антропогенном влиянии на природную среду посредством изменения качества поверхностных и подземных вод [3].

Современные антропогенные воздействия на водные экосистемы настолько многогранны, что даже при исследовании значительного количества абиотических параметров всегда остается сомнение, что еще какие-либо факторы все же остались неучтенными. Поэтому диагностика природной среды посредством биоиндикации используется все чаще и чаще. Основным недостатком метода является то, что, адекватно отражая результат негативных воздействий в целом, биоиндикация не объясняет, какими именно факторами это обусловлено. Поэтому наиболее эффективным оказывается сочетание обоих подходов [4].

О чистоте воды природного водоема можно судить по видовому разнообразию и обилию животного населения. Показателем качества воды может служить биотический перифитонный индекс (БПИ), который определяется по количеству ключевых и сопутствующих видов беспозвоночных животных, обитающих в исследуемом водоеме. Самый высокий биотический индекс определяется числом 10, он отражает качество воды экологически чистых водоемов, вода которых содержит количество биогенных элементов и кислорода, в ней отсутствуют вредные газы и химические соединения, способные ограничить обитание беспозвоночных животных [5].

Для определения биотического индекса (таблица 1) необходимо взять пробу воды из водоема с помощью водного сачка. В исследуемой пробе определяют ключевые виды и группы сопутствующих видов.

Под группой сопутствующих видов в одних случаях понимают род, или семейство, или класс беспозвоночных, в других – каждый вид.

Существенным дополнением к биотическому индексу может стать определение численности особей ключевых видов. Чем больше число особей ключевого вида, тем экологически чище водоем. Единичные особи ключевых видов свидетельствуют об ухудшении условий жизни.

В оценку включены только виды и группы организмов, которые имеют значение для оценки качества воды.

Таблица 1 – Соответствие между типами водотоков, классами качества воды и биотическим индексом (БПИ)

Тип водотока, группа, подгруппа	Класс качества воды	Воды	БПИ
Чистые, 1.1	I	Очень чистые	10–9
Чистые – слабо загрязненные, 1.2–2.2.	II	Чистые	8–7
Умеренно загрязненные, 3	III	Умеренно загрязненные	6–5
Загрязненные, 4	IV	Загрязненные	4
Грязные, 5	V	Грязные	3–2
Очень грязные, 6	VI	Очень грязные	1–0

Цель работы – оценка состава макрозообентоза природных водоемов Витебской области в условиях различной техногенной нагрузки.

Материалы и методы исследования

Определение биотического индекса. Пробы отбирались из пяти природных источников, расположенных в различных регионах Витебской области (таблица 2) и исследовались согласно ТКП 17.13-17-2014 «Порядок отбора проб и определение гидробиологических показателей. Макрозообентос»:

- 1) порядок отбора проб макрозообентоса;
- 2) порядок разбора проб макрозообентоса;
- 3) порядок определения таксономического состава и гидробиологических показателей.

Определен индекс Майера и модифицированный биотический индекс (МБИ).

Таблица 2 – Места отбора проб

Район	Место сбора	Водоем
Витебский	г. Витебск	р. Витьба
Дубровенский	д. Ляды	оз. Вордовье
Ушачский	д. Дубровка	оз. Дубровское
Шумилинский	а/г Башни	оз. Будовесть
Россонский	д. Селявщина	оз. Селявское

Пробы в Россонском районе были взяты из родника «Лазарева криница», который является гидрологическим памятником природы. Данная локация характеризуется низким антропогенным влиянием, и поэтому вода этого источника принята нами за контрольный образец.

Результаты исследований и их обсуждение

Зообентос удобен при оценке общего экологического состояния водоема. В практике биоиндикационных исследований наибольшее значение получил макрозообентос, представленный организмами разного систематического положения. Для оценки качества воды нами использован метод Майера, приемлемый для любых типов водоемов. Он основан на приуроченности различных групп водных беспозвоночных к водоемам с определенным уровнем загрязненности. При этом все организмы делятся на три индикаторные группы – группы Майера.

Группа I – обитатели чистых вод. К ним относятся личинки веснянок, поденок, ручейников, вислокрылок и двустворчатые моллюски.

Группа II – обитатели умеренно загрязненных вод. К ним относятся рачки-бокоплавцы, речной рак, личинки стрекоз, комаров-долгоножек, моллюски-катушки и живородки.

Группа III – обитатели загрязненных вод. К ним относятся личинки комаров-звонцов, пиявки, водяной ослик, моллюски-прудовики, личинки мошек и малощетинковые черви.

Все организмы, обнаруженные в пробе, распределяются в соответствии с индикаторными группами Майера. Количество организмов из первой группы (обитатели чистых вод) умножают на 3, количество организмов из второй группы – на 2, из третьей – на 1. Получившиеся цифры складывают и определяют индекс Майера. Этот показатель позволяет судить о степени загрязненности водоема: если индекс Майера превышает 22 балла – водоем имеет 1-й класс качества; индекс Майера от 17 до 21 баллов – 2-й класс качества; индекс Майера от 11 до 16 баллов – 3-й класс качества; индекс Майера меньше 11 баллов – 4–7-й классы качества.

Исследования проводились в июле 2022 г. Отбор проб бентоса проводили на глубине 0,5 м от берега гидрологическим сачком. На каждом озере выбрано пять участков, на каждом участке по три площадки размером 1 м². Таким образом, на каждом озере обследовано по 15 площадок площадью 1 м² каждая.

Озеро Селявское, расположено в Россонском районе, в 3,5 км к северу от д. Янковичи. Длина береговой линии – 7,4 км. Общая ширина полосы зарастания составляет 10–200 м, надводная ширина полосы зарастания – 5–50 м. Средняя глубина озера – 3,6 м, максимальная – 3,1 м. В местах сбора зообентоса встречались песчаные и илистые грунты. В составе прибрежного зообентоса выявлены представители 11 таксономических групп: ручейники, личинки стрекоз и веснянок, двустворчатые моллюски, брюхоногие моллюски, пиявки, водяные клещи, мотыль и поденки. В таблице 3 данные представители разбиты по индикаторным группам.

Таблица 3 – Организмы бентоса, выявленные при обследовании оз. Селявское

Обитатели чистых вод	Обитатели умеренно загрязненных вод	Обитатели загрязненных вод
Ручейники, двустворчатые моллюски, личинки поденок и веснянок	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка, бокоплав, личинки комаров-долгоножек	Пиявки, моллюски-прудовики, личинки комаров-звонцов

Индекс Майера оз. Селявское составил 23 балла, что соответствует 1-му классу качества воды (умеренно загрязненные воды).

Озеро Будовесть расположено в Шумилинском районе, в 8 км на юго-восток от городского поселка Шумилино. Береговая линия извилистая, длиной 12,6 км, образует заливы и полуострова. Генетический тип озера – эвтрофное. Литоральная зона песчаная, встречаются участки с илистыми грунтами и зарослями макрофитов. Средняя глубина озера – 5,15 м, максимальная – 10 м. В составе зообентоса выявлены представители шести таксономических групп: брюхоногие моллюски, личинки комаров-звонцов, стрекоз, живородящая лужанка, катушка, двустворчатые моллюски, личинки жука-плавунца. В таблице 4 данные представители разбиты по индикаторным группам.

Таблица 4 – Организмы бентоса, выявленные при обследовании оз. Будовесть

Обитатели чистых вод	Обитатели умеренно загрязненных вод	Обитатели загрязненных вод
Двустворчатые моллюски	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка	Моллюски-прудовики, личинки комаров-звонцов

Индекс Майера оз. Будовесьть составил 11 баллов, что соответствует 3-му классу качества воды (умеренно загрязненные воды).

Озеро Афанасьевское, расположено в 0,1 км от д. Лесковичи. Генетический тип озера – мезотрофное. Длина береговой линии – 8,2 км. Литоральная зона илистая. Общая ширина полосы зарастания составляет 0–30 м, надводная ширина полосы зарастания – 0–15 м. Средняя глубина озера – 6,7 м, максимальная – 30,7 м. В составе зообентоса выявлены представители восемь таксономических групп: прудовик, двустворчатые моллюски, личинки стрекоз, живородящая лужанка, катушка, бокоплав, пиявки, личинки поденок. В таблице 5 данные представители разбиты по индикаторным группам.

Таблица 5 – Организмы бентоса, выявленные при обследовании оз. Афанасьевское

Обитатели чистых вод	Обитатели умеренно загрязненных вод	Обитатели загрязненных вод
Двустворчатые моллюски, личинки поденок	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка, бокоплав	Моллюски-прудовики, пиявки

Индекс Майера оз. Афанасьевское составил 16 баллов, что соответствует 3-му классу качества воды (умеренно загрязненные воды).

Озеро Дубровское имеет длину береговой линии 6,03 м. Средняя глубина – 2,3 м, максимальная глубина – 3,9 м. Грунты илисто-песчаные и илистые. В составе зообентоса выявлены представители семи таксономических групп: прудовик, двустворчатые моллюски, личинки стрекоз, живородящая лужанка, катушка, пиявки, личинки поденок. В таблице 6 данные представители разбиты по индикаторным группам.

Таблица 6 – Организмы бентоса, выявленные при обследовании оз. Дубровское

Обитатели чистых вод	Обитатели умеренно загрязненных вод	Обитатели загрязненных вод
Двустворчатые моллюски, личинки поденок и веснянок	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка, личинки комаров-долгоножек	Моллюски-прудовики, пиявки

Индекс Майера оз. Дубровское составил 19 баллов, что соответствует 2-му классу качества воды (умеренно загрязненные воды).

Зообентос р. Витьбы составили: катушка, прудовик, личинки стрекоз, комаров-звонцов. Индекс Майера – 6 баллов, что соответствует 4-му классу качества воды (грязные воды) (таблица 7).

Таблица 7 – Организмы бентоса, выявленные при обследовании р. Витьба

Обитатели чистых вод	Обитатели умеренно загрязненных вод	Обитатели загрязненных вод
–	Личинки стрекоз, катушка	Личинки комаров-звонцов, моллюски-прудовики

В ходе исследования установлено, что воды исследуемых озер относятся к 1-му, 2-му и 3-му классу качества воды (таблица 8). Минимальное количество баллов – 11 по шкале Майера – характерно для оз. Будовесьть, максимальное – 23 баллов – для оз. Селявское. Воды р. Витьбы относятся к грязным – 6 баллов по шкале Майера.

В ходе исследования установлено, что воды природных водоемов относятся к 1-му, 2-му и 3-му классу качества воды (таблицы 8, 9). Минимальное количество баллов – 11 по шкале Майера – характерно для оз. Будовесьть, максимальное – 23 балла – для оз. Селявское. Воды р. Витьбы относятся к грязным – 6 баллов по шкале Майера.

Таблица 8 – Характеристика класса качества воды в исследуемых водоемах по методу Майера

Название водоема	Балл по шкале Майера	Класс качества воды
оз. Будовесть	11	3-й (умеренно загрязненные)
оз. Селявское	23	1-й (чистые)
оз. Дубровское	19	2-й (достаточно чистые)
оз. Афанасьевское	16	3-й (умеренно загрязненные)
р. Витьба	6	4-й (грязные)

Таблица 9 – Организмы бентоса, выявленные при обследовании

Обитатели чистых вод	Обитатели умеренно загрязненных вод	Обитатели загрязненных вод
оз. Будовесть		
Двустворчатые моллюски	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка	Моллюски-прудовики, личинки комаров-звонцов
оз. Селявское		
Ручейники, двустворчатые моллюски, личинки поденок и веснянок	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка, бокоплав, личинки комаров-долгоножек	Пиявки, моллюски-прудовики, личинки комаров-звонцов
оз. Дубровское		
Двустворчатые моллюски, личинки поденок и веснянок	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка, личинки комаров-долгоножек	Моллюски-прудовики, пиявки
оз. Афанасьевское		
Двустворчатые моллюски, личинки поденок	Личинки стрекоз, катушка, живородящая лужанка, бокоплав	Моллюски-прудовики, пиявки
р. Витьба		
–	Личинки стрекоз, катушка	Личинки комаров-звонцов, моллюски-прудовики

Загрязнение водоемов происходит как естественным путем (поступают с дождевыми водами, смываются с берегов, а также образуются в процессе развития и отмирания животных и растительных организмов), так и искусственным путем (в результате хозяйственной деятельности человека).

Установлено, что исследуемые водоемы подвержены различному уровню антропогенной нагрузки (таблица 10), степень которой влияет на гидрохимические показатели, биотический индекс и, как следствие, на класс чистоты природных вод.

Наименьшей антропогенной нагрузкой характеризуется оз. Селявское Россонского р-на (0 баллов), затем уровень неблагоприятного влияния усиливается в ряду водоемов: оз. Дубровское Ушачского р-на (5 баллов), оз. Будовесть Шумилинского р-на (7 баллов), оз. Афанасьевское Дубровенского р-на (8 баллов), р. Витьба Витебского р-на (10 баллов).

Класс качества воды имеет закономерные с увеличением антропогенной нагрузки характеристики: оз. Селявское – 1-й класс (чистый водоем), оз. Дубровское – 2-й класс (достаточно чистый водоем), оз. Будовесть и оз. Афанасьевское – 3-й класс (умеренно загрязненные водоемы), р. Витьба – 4-й класс (грязный водоем).

Таблица 10 – Места отбора проб и уровень антропогенной нагрузки

Район	Место сбора	Водоем	Уровень антропогенной нагрузки (баллы)
Шумилинский	а/г Башни	оз. Будовесь	7
Россонский	д. Селявщина	оз. Селявское	0
Ушачский	д. Дубровка	оз. Дубровское	5
Дубровенский	д. Шеки	оз. Афанасьевское	8
Витебский	г. Витебск	р. Витьба	10

Примечание – максимальная антропогенная нагрузка – 14 баллов

Для выбора соответствующей модели для анализа, наиболее адекватно характеризующей отношение между биотическим индексом водоема, численностью видов и их количеством, определяющими чистоту воды и степень антропогенной нагрузки, оказываемой на озера Белорусского Поозерья, был проведен разведочный анализ.

Установлено, что для оценки состояния водоема большое значение имеет количество кислорода, растворенного в воде. Содержание кислорода в воде зависит от различных факторов. Обогащение воды кислородом происходит в результате абсорбции кислорода из атмосферы; выделения кислорода водной растительностью в процессе фотосинтеза; поступления в водоемы с дождевыми и снеговыми водами.

К группе процессов, уменьшающих содержание кислорода в воде, относятся дыхание организмов, биохимическое и химическое окисление. Дефицит кислорода часто наблюдается в водоемах с большим содержанием загрязняющих органических веществ, а также биогенных и гумусовых веществ. В водах исследуемых водоемов содержание растворенного кислорода варьирует в широких пределах (от 0 до 14 мг/дм³) и зависит от сезона и суток определения. Минимальная концентрация растворенного кислорода составляет около 5 мг/дм³, в исследуемой воде не зафиксирована.

Заклучение

Возрастающее антропогенное загрязнение пресных водоемов становится все более острой экологической и социальной проблемой. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы разработки достаточно простых и информативных методов биоиндикации его воздействия на биоту водоемов, которые возможно применить в мониторинговых и серийных эколого-токсикологических исследованиях. Для биологической индикации качества вод могут быть использованы практически все группы организмов, населяющие водоемы: планктонные и бентосные беспозвоночные, простейшие, водоросли, макрофиты, бактерии и рыбы. Каждая из них, выступая в роли биологического индикатора, имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют границы ее использования при решении задач биоиндикации.

Индикация пяти природных водоемов Белорусского Поозерья по биотическому индексу показала различие в их экологическом статусе. В практике биоиндикационных исследований наибольшее значение имеет макрозообентос, представленный организмами разного систематического положения. Для оценки использован метод Майера, приемлемый для любых типов водоемов. В результате исследований установлено, что воды изученных водоемов относятся к 1-му, 2-му, 3-му и 4-му классам качества воды. Минимальное количество баллов (6 по шкале Майера) характерно для реки Витьба (относится к грязным водоемам – 4-й класс), максимальное (23 балла) – для оз. Селявское (относится к чистым водоемам – 1-й класс). К достаточно чистым водоемам (2-й класс, 19 баллов) относится оз. Дубровское. К умеренно загрязненным водоемам (3-й класс) относятся озера Будовесь (11 баллов) и Афанасьевское (16 баллов).

Результаты исследования коррелируют с уровнем техногенного воздействия на изученные пять водоемов Белорусского Поозерья. Установлено, что обследованные водоемы подвержены различному уровню антропогенной нагрузки, степень которой влияет на гидрохимические показатели, биотический индекс и, как следствие, на класс чистоты природных вод. Наименьшей антропогенной нагрузке подвержено оз. Селявское (Россонский р-н) (0 баллов), затем уровень неблагоприятного влияния усиливается в ряду водоемов: оз. Дубровское (Ушачский р-н) (5 баллов), оз. Будовесь (Шумилинский р-н) (7 баллов), оз. Афанасьевское (Дубровенский р-н) (8 баллов), р. Витьба (Витебский р-н) (10 баллов).

Класс качества воды имеет закономерные в силе антропогенной нагрузке характеристики: оз. Селявское – 1-й класс (чистый водоем), оз. Дубровское – 2-й класс (достаточно чистый водоем), озера Будовесь и Афанасьевское – 3-й класс (умеренно загрязненные водоемы), р. Витьба – 4-й класс (грязный водоем).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинченко, Т. Д. Результаты и перспективы биоиндикационных исследований водоемов и водотоков Волжского бассейна (на примере хирономид, Diptera: Chironomidae) / Т. Д. Зинченко // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2006. – № 1. – С. 248–262.
2. Карташева, Н. В. Диагностика качества вод в реках по структурным показателям планктона / Н. В. Карташева, А. Г. Недосекин. – Самара, 2006. – С. 56.
3. Трифонова, И. С. Биоиндикация в лимнологическом мониторинге / И. С. Трифонова // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем : избр. докл. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 23–27 окт. 2006 г. – СПб., 2007. – С. 23–28.
4. Шуйский, В. Ф. Закономерности лимитирования пресноводного макрозообентоса экологическими факторами : дис. ... д-ра биол. наук / В. Ф. Шуйский. – СПб., 1997. – 639 л.
5. Котова, Л. И. Биологический контроль качества вод / Л. И. Котова, Л. П. Рыжикова. – М. : Наука, 1989. – 240 с.
6. Биологическая и геоэкологическая оценка состояния, сохранения и использования природно-ресурсного потенциала Белорусского Поозерья / О. М. Балаева-Тихомирова [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике : материалы регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов, Витебск, 11–12 февр. 2016 г. : в 2 т. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2016. – Т. 1. – С. 62–69.

REFERENCES

1. Zinchienko, T. D. Riezul'taty i pierspiektivy bioindekacionnykh issliedovaniy vodojmov i vodotokov Volzhskogo bassiejna (na primierie khironomid, Diptera: Chironomidae) / T. D. Zinchienko // Izv. Samar. nauch. centra RAN. – 2006. – № 1. – S. 248–262.
2. Kartasheva, N. V. Diagnostika kachiestva vod v riekakh po strukturnym pokazatieliam planktona / N. V. Kartasheva, A. G. Niedosiekin. – Samara, 2006. – S. 56.
3. Trifonova, I. S. Bioindikacija v limnologichieskom monitoringie / I. S. Trifonova // Bioindikacija v monitoringie priesnovodnykh ekosistiem : izbr. dokl. Mizhdunar. konf., Sankt-Pietierburg, 23–27 okt. 2006 g. – SPb., 2007. – S. 23–28.
4. Shujskij, V. F. Zakonomiernosti limitirovanija priesnovodnogo makrozoobientosa ekologichieskimi faktorami : dis. ... d-ra biol. nauk / V. F. Shujskij. – SPb, 1997 – 639 l.
5. Kotova, L. I. Biologichieskij kontrol' kachiestva vod / L. I. Kotova, L. P. Ryzhikova. – M. : Nauka, 1989. – 240 s.

6. Biologichieskaja i gieoekologichieskaj ocenka sostojanija, sokhranienija i ispol'zovanija prirodno-riesurnogo potenciala Bielorussskogo Poozier'ja / O. M. Balajeva-Tikhomirova [i dr.] // Nauka – obrazovaniju, proizvodstvu, ekonomikie : materialy riegion. nauch.-prakt. konf. priepodavatieliej, nauch. sotrudnikov i aspirantov, Vitiebsk, 11–12 fievr. 2016 g. : v 2 t. – Vitiebsk : VGU im. P. M. Masherova, 2016. – T. 1. – S. 62–69.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 02.10.2023

УДК 577.175.1: 57.085

**Виктор Викторович Коваленко¹, Светлана Михайловна Ленивко²,
Нонна Степановна Ступень³**

¹ст. преподаватель каф. зоологии, генетики и химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²канд. биол. наук, доц., доц. каф. зоологии, генетики и химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

³канд. техн. наук, доц., доц. каф. зоологии, генетики и химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Viktar Kavalenka¹, Svetlana Lenivko², Nonna Stupen³

¹Senior lecturer of the Department of Zoology, Genetics and Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Zoology, Genetics and Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

³Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Zoology, Genetics and Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: kvv0407@rambler.ru

РОСТРЕГУЛИРУЮЩАЯ И ПРОТЕКТОРНАЯ АКТИВНОСТЬ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ KE-373 НА КУЛЬТУРЕ РЖИ ПОСЕВНОЙ (*SECALE CEREALE* L.)

По комплексу показателей роста и развития растений исследована рострегулирующая и протекторная активность кремнийорганического соединения KE-373 на культуре ржи посевной. Установлен статистически достоверный стимулирующий эффект соединения KE-373 в отношении показателей энергии прорастания, всхожести, длины корня и количества корней. Зафиксирован больший стимулирующий эффект на растениях, подвергшихся действию низких температур.

Ключевые слова: кремнийорганические соединения, рожь посевная, энергия прорастания, всхожесть, длина корня, количество корней, длина побега.

Growth-Regulating and Protective Activity of Organosilicon Compound KE-373 on Rye (*Secale Cereale* L.)

According to the complex of plant growth and development indicators, the growth-regulating and protective activity of the organosilicon compound KE-373 on a crop of rye was studied. A statistically significant stimulating effect of the compound KE-373 was established in relation to the indicators of germination energy, germination, root length and number of roots. A greater stimulating effect was recorded on plants exposed to low temperatures.

Key words: organosilicon compounds, rye, germination energy, germination, root length, number of roots, shoot length.

Введение

Кремнийорганические соединения, принадлежащие к гидрооксалатам γ -аминопропилсиланов, впервые получены на кафедре химии БрГУ имени А. С. Пушкина под руководством профессора Н. П. Ерчака. Данные соединения являются веществами, проявляющими стимулирующий эффект в отношении показателей роста и развития растений [1]. Так, гидрооксалаты γ -аминопропилсиланов проявляют рострегулирующую активность в отношении ряда сельскохозяйственных культур: люпина узколистного, гороха посевного, пшеницы мягкой, редиса.

Отметим, что биологическое действие гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов не ограничивается только регуляцией роста растений. Эти соединения оказывают влияние

на антиоксидантную защиту растений и могут выступать в качестве регуляторов роста растений, подвергнутых токсическому действию ионов свинца [2], обладают протекторной активностью в отношении содержания нитратов в корнеплодах редиса [3], способствуют индукции процессов каллусообразования и эмбриодогенеза у сортов пшеницы [4]. Предложен подход по оптимизации питательных сред для культивирования эксплантов пшеницы, включающий применение гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов [5].

Важность соединений кремния для растений подтверждает тот факт, что растения способны к перераспределению кремния и обладают механизмом, обеспечивающим его концентрирование в органах и тканях, подверженных стрессу. Отмечается, что оптимизация кремниевого питания растений способствует увеличению жизнеспособности растений [6]. Приемами повышения урожайности растений, качества продукции, защиты растений от болезней, полегания, неблагоприятных факторов внешней среды является не только корневое поступление кремния в растения, но и питание через лист, а также предпосевная обработка семян [7].

На предыдущем этапе исследования статистически подтверждено, что индукция морфогенеза в культуре незрелых зародышей *Triticum aestivum* L. детерминируется как генотипом, так и кремнийорганическим компонентом питательной среды.

Соединение KE-373 в концентрации 10^{-6} М способствует достоверному повышению числа новообразований в культуре пыльников у сорта Центос с озимым типом развития преимущественно за счет формирования морфогенных каллусов, а у сорта Банти с яровым типом развития – за счет увеличения числа эмбриоидов. Положительное влияние концентрации 10^{-6} М на пыльцевой эмбриодогенез показано и у озимого сорта Легенда. Повышение эффективности показателей пыльцевого морфогенеза при снижении концентрации соединения KE-373 до 10^{-7} М обнаружено на примере сорта Банти. Таким образом, использование определенных концентраций соединения KE-373 способствует повышению эффективности показателей пыльцевого морфогенеза, индукции процессов каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей сортов мягкой пшеницы [8].

В проводимых биоиспытаниях важным фактором является увеличение тест-объектов, поскольку физиологические эффекты, вызываемые химическими соединениями, могут определяться не только видовыми, но и сортовыми особенностями растений.

Цель настоящей работы – оценка рострегулирующей и протекторной активности соединения KE-373 на культуре ржи посевной (*Secale cereale* L.).

Материал и методы исследования

В первой серии эксперимента изучена рострегулирующая активность соединения KE-373 в отношении растений ржи посевной в условиях оптимального температурного режима. Эксперимент проводился в трехкратной повторности по 100 семян в каждой повторности. Семена замачивались в дистиллированной воде (контроль) либо в 10^{-7} М растворе соединения KE-373 (опыт) в течение 5 часов. Проращивание семян осуществлялось между слоями фильтровальной бумаги в соответствии с ГОСТ [9] при постоянной температуре в темноте в термостате.

На третьи сутки определялась энергия прорастания. На седьмые сутки определялись всхожесть семян, а также количество корней, длина самого длинного корня и длина побега проростков.

Во второй серии эксперимента семена подвергались действию низких температур. Для этой цели семена после предпосевной обработки выдерживали сутки в холодильнике при температуре 2 °С, после чего их переносили в термостат и проращивали, как и в первой серии эксперимента.

Статистическую обработку результатов проводили в соответствии с общепринятыми методиками биологической статистики согласно П. Ф. Рокицкому [10] с использованием программы Microsoft Excel. Установление достоверности различий от контроля проводили нахождением t-критерия Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные, полученные в ходе лабораторного эксперимента по изучению влияния кремнийорганического соединения КЕ-373 на растения ржи посевной в условиях оптимального температурного режима, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях оптимального температурного режима

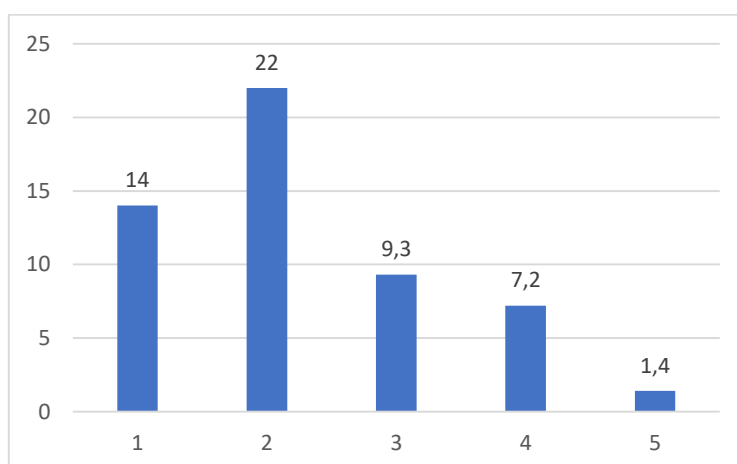
Вариант опыта	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Длина корня, см	Количество корней, шт	Длина побега, см
Контроль	68 ± 2,69	72 ± 2,59	8,47 ± 0,36	5,44 ± 0,11	8,99 ± 0,35
Опыт	82 ± 2,22**	94 ± 1,37**	9,26 ± 0,34	5,83 ± 0,16*	9,12 ± 0,35

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,001$

На основании приведенных в таблице 1 данных, следует отметить значительное влияние изучаемого соединения на начальные этапы роста ржи посевной, что выражается в увеличении энергии прорастания и всхожести. Нами зафиксировано статистически достоверное увеличение энергии прорастания на 14 %, всхожести – на 22 % по сравнению с контролем.

Увеличение показателя длины корня в опытном варианте эксперимента составляет 9,3 % по сравнению с контрольным вариантом, увеличение количества корней – 7,2 %, увеличение длины побега – 1,4 %.

Таким образом, под действием соединения КЕ-373 происходит увеличение всех изучаемых показателей роста ржи посевной по сравнению с контролем (рисунок 1). Статистически достоверным является стимулирующий эффект соединения КЕ-373 на энергию прорастания, всхожесть семян и количество корней.



1 – энергия прорастания; 2 – всхожесть; 3 – длина корня;
4 – количество корней; 5 – длина побега

Рисунок 1 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях оптимального температурного режима, % относительно контроля

Данные, полученные в ходе эксперимента по изучению влияния соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях температурного стресса, вызванного действием низких температур, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях температурного стресса

Вариант опыта	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Длина корня, см	Количество корней, шт	Длина побега, см
Контроль	36 ± 2,77	46 ± 2,88	7,04 ± 0,32	5,65 ± 0,17	7,84 ± 0,32
Опыт	70 ± 2,65*	86 ± 2,88*	9,02 ± 0,24*	5,90 ± 0,11	8,38 ± 0,22

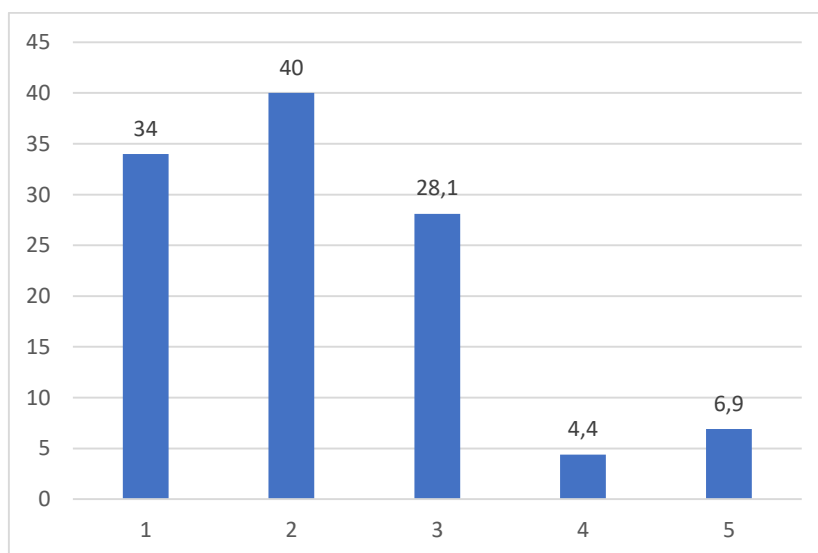
Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,001$.

Анализ данных, приведенных в таблице 2 позволяет утверждать, что под действием соединения КЕ-373 энергия прорастания и всхожесть семян ржи посевной увеличиваются на 34 и 40 % соответственно по сравнению с контролем. Эти отличия опыта и контроля имеют статистически достоверный характер.

Статистически достоверным является также увеличение показателя длины корня в опытном варианте по сравнению с контрольным вариантом, которое составляет 28,1 %.

Отличия в показателях количества корней и длины побега менее значительны. Увеличение количества корней под действием соединения КЕ-373 составляет 4,4 %, увеличение длины побега – 6,9 %.

Таким образом, под действием соединения КЕ-373 наблюдается увеличение всех изучаемых показателей роста растений ржи посевной, подвергшихся температурному стрессу по сравнению с контролем (рисунок 2). Статистически достоверным является стимулирующий эффект соединения КЕ-373 на энергию прорастания, всхожесть семян и длину корня.



1 – энергия прорастания; 2 – всхожесть; 3 – длина корня;
4 – количество корней; 5 – длина побега

Рисунок 2 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях температурного стресса, % относительно контроля

Следует отметить, что важной функцией соединений кремния является стимуляция развития корневой системы [11]. Улучшение кремниевого питания растений способствует увеличению количества корней, а дефицит кремниевого питания лимитирует развитие корневой системы [6]. Как отмечается в литературе, рост корней на клеточном уровне зависит от числа меристематических клеток и длины меристемы. При этом механизмы контроля длины меристемы остаются мало выясненными [12].

В проведенном нами исследовании показано, что в благоприятных условиях соединение КЕ-373 оказывает достоверное влияние на формирование количества корней, а в условиях температурного стресса существенно увеличивает длину корня у ржи посевной. Возможно, это свидетельствует о синергетическом эффекте действия соединения КЕ-373 и низких температур.

В таблице 3 приведены результаты двух серий проведенного эксперимента, позволяющие сопоставить их между собой.

Таблица 3 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной, % относительно контроля

Вариант опыта	Энергия прорастания	Всхожесть	Длина корня	Количество корней	Длина побега
Оптимальная температура	14	22	9,3	7,2	1,4
Температурный стресс	34	40	28,1	4,4	6,9

Анализ приведенных в таблице 3 данных, позволяет сделать вывод, что в отношении четырех из пяти исследованных показателей роста («энергия прорастания», «всхожесть», «длина корня», «длина побега») большой стимулирующий эффект соединения КЕ-373 демонстрирует на растениях, подвергшихся действию низких температур. При этом изменчивость качественных показателей роста («энергия прорастания» и «всхожесть») оказалась более существенной.

Результаты настоящего исследования согласуются с ранее полученными данными о биологической активности соединения КЕ-373. Так, на растениях люпина узколистного было показано, что под действием 10^{-4} М раствора КЕ-373 наблюдается статистически достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести семян и длины корня проростков. В данном варианте увеличение показателя энергии прорастания составляет 6 %, увеличение всхожести – 5 %, увеличение длины корня – 25 % по сравнению с контролем. На растениях гороха посевного показано, соединение КЕ-373 оказывает статистически достоверное стимулирующее действие в отношении показателей длины корня и длины побега проростков гороха. Под влиянием 10^{-5} М и 10^{-6} М растворов КЕ-373 увеличение длины корня составляет 28 % и 16 %, увеличение длины побега – 63 и 73 % соответственно по сравнению с контролем. На растениях пшеницы мягкой показано, что под действием 10^{-5} М и 10^{-6} М растворов КЕ-373 наблюдается статистически достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести семян, длины корня и длины побега проростков пшеницы. В варианте опыта с 10^{-5} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 14 %, увеличение всхожести – 23 %, увеличение длины корня – 13,7 %, увеличение длины побега – 52,4 % по сравнению с контролем. В варианте опыта с 10^{-6} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 32 %, увеличение всхожести – 27 %, увеличение длины корня – 15,1 %, увеличение длины побега – 43,3 % по сравнению с контролем. На растениях редиса показано, что под действием 10^{-5} М и 10^{-6} М растворов КЕ-373 наблюдается статистически

достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести семян и длины корня проростков редиса. В варианте опыта с 10^{-5} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 13 %, увеличение всхожести – 18 %, увеличение длины корешков – 44,5 % по сравнению с контролем. В варианте опыта с 10^{-6} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 14 %, увеличение всхожести – 17 %, увеличение длины корня – 37,5 % по сравнению с контролем [13].

Полученные нами результаты согласуются с литературными данными, согласно которым поступление кремния в растения повышает устойчивость растений к биогенным и абиогенным стрессам. Как отмечает В. В. Матыченков, оптимальное кремниевое питание растений способствует повышению всхожести, устойчивости растений к солевой токсичности, недостатку воды, низким температурам, действию тяжелых металлов. Отмечается, что действие стрессоров биогенной и абиогенной природы приводит к значительному увеличению содержания кремния в тканях растений. Кроме того, существует корреляция между интенсивностью стресса и содержанием общего кремния в растении [6].

Заклучение

Оценка рострегулирующей и протекторной активности кремнийорганического соединения КЕ-373 по комплексу показателей роста ржи посевной позволяет говорить о том, что соединение КЕ-373 проявляет стимулирующий эффект в отношении всех изучаемых показателей. Более значительным является влияние соединения КЕ-373 на показатели энергии прорастания, всхожести семян, длины корня и количества корневых проростков ржи посевной.

Зафиксировано, что соединение КЕ-373 проявляет протекторную активность к действию низких температур. Растения, подвергшиеся температурному стрессу, демонстрируют большую отзывчивость к действию КЕ-373. Отличия показателей роста ржи посевной в данной серии эксперимента более значительны, чем в серии эксперимента с растениями, не подвергшимися температурному стрессу.

Полученные результаты согласуются с литературными данными о биологическом значении соединений кремния в формировании устойчивости растений к различным стресс-факторам биогенной и абиогенной природы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сравнительная активность гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов / Н. П. Ерчак [и др.] // Весн. Брєсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2010. – № 1. – С. 28–40.
2. Влияние гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов на активность антиоксидантных ферментов злаковых культур в условиях токсического действия ионов свинца / Е. Г. Артемук [и др.] // Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. пр. – Брєст : Альтернатыва, 2012. – Вып. 5. – С. 6–9.
3. Коваленко, В. В. Биологическая активность кремнийорганических соединений / В. В. Коваленко, О. О. Ломакова, Н. П. Ерчак // Менделеевские чтения – 2011 : сб. материалов межвуз. науч.-метод. конф., Брєст, 25 фєв. 2011 г. / Брєст. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Н. С. Ступень. – Брєст : БрГУ, 2011. – С. 55–58.
4. Оптимизация состава питательной среды для индукции каллусообразования в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы / С. М. Ленивко [и др.] // Клеточная биология и биотехнология растений : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–15 фєвр. 2013 г. / ред. совет: В. В. Демидчик [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – С. 192.
5. Новый подход по оптимизации питательных сред для культивирования эксплантов пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / С. М. Ленивко [и др.] // Весн. Брєсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2011. – № 2. – С. 48–52.

6. Матыченков, В. В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва – растение : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.12, 03.00.27 / В. В. Матыченков. – Пушино, 2008. – 32 с.
7. Самсонова, Н. Е. Кремний в растительных и животных организмах / Н. Е. Самсонова // *Агрехимия*. – 2019. – № 1. – С. 86–96.
8. Ленивко, С. М. Влияние *in vitro* гидрооксалата- γ -аминопропилсилана (KE-373) на морфогенез различных типов эксплантов пшеницы / С. М. Ленивко, В. В. Коваленко, Н. С. Ступень // *Вестн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі*. – 2022. – № 2. – С. 29–38.
9. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038–84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.
10. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Ураджай, 1973. – 320 с.
11. Adatia, M. H. // The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution / M. H. Adatia, R. T. Besford // *Annals Bot.* – 1986. – Vol. 58. – P. 343–351.
12. Сравнительный анализ роста корней разных видов растений на клеточном уровне / Н. В. Жуковская [и др.] // *Физиология растений*. – 2020. – Т. 67, № 4. – С. 369–377.
13. Коваленко, В. В. Биологическая активность кремнийорганического соединения KE-373 / В. В. Коваленко // *Менделеевские чтения – 2022 : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию с междунар. участием, Брест, 25 февр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: Э. А. Тур, Е. Г. Артемук (отв. ред.), Н. С. Ступень. – Брест : БрГУ, 2022. – С. 62–65.*

REFERENCES

1. Sravnitel'naja aktivnost' gidrooksalatov γ -aminopropilsilanov / N. P. Yerchak [i dr.] // *Viesn. Brest. un-ta. Ser. 5, Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli*. – 2010. – № 1. – S. 28–40.
2. Vlijanije gidrooksalatov γ -aminopropilsilanov na aktivnost' antioksidantnykh fermentov zlakovykh kul'tur v uslovijakh toksichieskogo dejstvija ionov svinca / Ye. G. Artiemuk [i dr.] // *Pryrodnaje asiaroddzie Paliessia: asablivasci i pierspiektyvy razvicia : zb. navuk. pr.* – Brest : Al'ternativa, 2012. – Vyp. 5. – S. 6–9.
3. Kovalienko, V. V. Biologichieskaja aktivnost' kriemnijorganichieskikh sojedinenij / V. V. Kovalienko, O. O. Lomakova, N. P. Yerchak // *Miendieliejevskije chtienija – 2011 : sb. materialov miezhvuz. nauch.-mietod. konf., Brest, 25 fevr. 2011 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. ried. N. S. Stupien'.* – Brest : BrGU, 2011. – S. 55–58.
4. Optimizacija sostava pitatel'noj sriedy dlja indukcii kallusoobrazovanija v kul'turie niezrielykh zarodyshej miagkoj pshenicy / S. M. Lienivko [i dr.] // *Klietchnaja biologija i biotiekhnologija rastienij : tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 13–15 fevr. 2013 g. / ried. soviet: V. V. Diemidchik [i dr.]*. – Minsk : BGU, 2013. – S. 192.
5. Novyj podkhod po optimizacii pitatel'nykh sried dlja kul'tivirovanija eksplantov pshenicy (*Triticum aestivum* L.) / S. M. Lienivko [i dr.] // *Viesn. Brest. un-ta. Ser. 5. Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli*. – 2011. – № 2. – S. 48–52.
6. Matychienkov, V. V. Rol' podvizhnykh sojedinenij kriemnija v rastienijakh i sistemie pochva – rastienije : avtorief. dis. ... d-ra biol. nauk : 03.00.12, 03.00.27 / V. V. Matychienkov. – Pushchino, 2008. – 32 s.
7. Samsonova, N. Ye. Kriemnij v rastitel'nykh i zhivotnykh organizmakh / N. Ye. Samsonova // *Agrokhimija*. – 2019. – № 1. – S. 86–96.
8. Lienivko, S. M. Vlijanije *in vitro* gidrooksalata- γ -aminopropilsilana (KE-373) na morfogenez razlichnykh tipov eksplantov pshenicy / S. M. Lienivko, V. V. Kovalienko,

N. S. Stupien' // Viesn. Bresc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2022. – № 2. – S. 29–38.

9. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielienija vskhozhesti : GOST 12038–84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.

10. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Uradzhaj, 1973. – 320 s.

11. Adatia, M. H. // The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution / M. H. Adatia, R. T. Besford // Annals Bot. – 1986. – Vol. 58. – P. 343–351.

12. Sravnitel'nyj analiz rosta korniej raznykh vidov rastenij na klietochnom urovnie / N. V. Zhukovskaja [i dr.] // Fiziologija rastenij. – 2020. – T. 67, № 4. – S. 369–377.

13. Kovalienco, V. V. Biologichieskaja aktivnost' kriemnijorganichieskogo sojedinenija KE-373 / V. V. Kovalienco // Miendieliejevskije chtienija – 2022 : sb. materialov Riesz. nauch.-prakt. konf. po khimii i khim. obrazovaniju s miezhdunar. uchastijem, Briesť, 25 fievr. 2022 g. / Briesť. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; riedkol.: Ye. A. Tur, Ye. G. Artiemuk (otv. ried.), N. S. Stupien'. – Briesť : BrGU, 2022. – S. 62–65.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 05.10.2023

УДК 579.8; 579.06; 579.26

*Алёна Александровна Кремза¹, Алина Юрьевна Ларченко²,
Светлана Леонидовна Василенко³, Мария Ивановна Мандрык⁴*

¹студент 4-го курса биологического факультета
Белорусского государственного университета

²мл. науч. сотрудник научно-исследовательской лаб. биотехнологии каф. микробиологии
Белорусского государственного университета

³канд. биол. наук, зав. каф. микробиологии
Белорусского государственного университета

⁴канд. биол. наук, доц., доц. каф. микробиологии
Белорусского государственного университета

Aliona Kremza¹, Alina Larchenka², Svetlana Vasylenko³, Maryia Mandryk⁴

¹4-th year student of the Department of Microbiology of Belarusian State University

²Junior Science Researcher of the Laboratory of Biotechnology of Department of Microbiology
of Belarusian State University

³Candidate of Biological Sciences, Head of the Department of Microbiology
of Belarusian State University

⁴Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Microbiology
of Belarusian State University

e-mail: mm-cher@tut.by

РАЗНООБРАЗИЕ И МЕТАБОЛИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ МИКРООРГАНИЗМОВ ИЗ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ*

Представлены данные о микробиологическом, молекулярно-генетическом анализе почвенного микробного сообщества. Объектами исследования являлись образцы почвы сельскохозяйственного назначения, отобранные на различном расстоянии (50, 75 и 100 м) от Минской кольцевой автодороги (МКАД). Цель – микробиологический, молекулярно-генетический анализ и оценка деградативного потенциала микроорганизмов из почвы сельскохозяйственного назначения. Установлено, что близкое расположение автомагистрали оказывает негативное воздействие на различные физиологические группы почвенных микроорганизмов за исключением деструкторов нефтепродуктов. Молекулярно-генетический анализ почвенной метагеномной ДНК позволил выявить детерминанты, связанные с утилизацией алканов и нафталина, бактерий родов *Rhodococcus* и *Pseudomonas*. Для 42 изолятов исследован спектр утилизируемых углеводородных субстратов. Из них 20 использовали в качестве источника углерода гексадекан, 15 – дизельное топливо, 8 – октан, 5 – о-ксилол, 4 – толуол, 2 – бензол, фенол не утилизировал ни один из исследуемых изолятов. Наибольшим спектром утилизируемых субстратов обладает изолят № 15, выделенный на среде ПДА, что делает его перспективным для использования в природоохранных биотехнологиях.

Ключевые слова: почва, антропогенное воздействие, физиологические группы микроорганизмов, бактерии-деструкторы, углеводороды.

Diversity and Metabolic Potential of Microorganisms from Agricultural Soils

The paper presents data on microbiological, and molecular genetic analysis of the soil microbial community. The objects of study were agricultural soil samples taken at different distances (50, 75 and 100 m) from the Minsk Ring Road (MRR). The aim is microbiological, molecular genetic analysis and assessment of the degradative potential of microorganisms from agricultural soil. It has been established that the proximity of the highway has a negative impact on various physiological groups of soil microorganisms, with the exception of oil decomposers. Molecular genetic analysis of soil metagenomic DNA revealed the determinants associated with the utilization of alkanes and naphthalene, belonging to bacteria of the genera *Rhodococcus* and *Pseudomonas*. For 42 isolates, the spectrum of utilized hydrocarbon substrates was studied. Of these, 20 used hexadecane as a carbon source, 15 – diesel fuel, 8 – octane, 5 – o-xylene, 4 – toluene, 2 – benzene, and none of the studied isolates utilized phenol. Isolate no. 15, isolated on peptone-yeast medium, has the greatest range of utilized substrates, which makes it promising for use in environmental biotechnologies.

Key words: soil, anthropogenic impact, physiological groups of microorganisms, hydrocarbon-degrading bacteria, hydrocarbons.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант 2022 г.), (задание 3.6.2 ГПНИ «Биотехнологии» (2021–2023 гг.)).

Введение

Главным составляющим любой агроэкосистемы является почва. Качественная почва, содержащая достаточное количество разнообразных питательных и минеральных веществ, служит основой хорошего урожая. Почва является наиболее богатой средой обитания для микроорганизмов и характеризуется высоким разнообразием микробных сообществ. В почве протекает множество взаимосвязанных процессов, таким образом она представляет собой сложную систему.

Деятельность человека порой нарушает слаженную работу этой системы, что в итоге приводит к тому, что почва перестает выполнять свои экологические функции в полной мере. Среди такой деятельности можно выделить нерациональное земледелие, которое зачастую вызывает эрозию почв и аридизацию, что проявляется в потере почвенного плодородия. Также последующее использование минеральных удобрений для повышения плодородия почв может оказать негативное влияние на свойства почвы, т. к. не весь азот и фосфор усваивается растениями – значительная их часть вымывается дождем, из-за чего они накапливаются в грунтовых водах, что приводит к загрязнению водоемов и, как следствие, частичному сокращению видового состава [1]. Одной из глобальных проблем, вызванных деятельностью человека, является загрязнение экосистем нефтью и нефтепродуктами.

Углеводороды нефти по-прежнему используются в качестве основного источника энергии и являются наиболее опасными загрязнителями окружающей среды [2]. Нефтяные загрязнения способствуют изменению химического и биологического состава, а также физических свойств всех экосистем [3; 4]. Данные соединения, имеющие разную химическую природу (алифатические, моноароматические, полиароматические и их производные) попадают в окружающую среду в результате аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, при сгорании различных видов топлива, выбросах коксо-, газо- и нефтехимических производств, а также с выхлопными газами автомобилей [5; 6]. Углеводороды, в особенности полициклические ароматические соединения, являются токсичными, мутагенными, канцерогенными и тератогенными для живых организмов [7; 8].

Почва является крайне сложной средой обитания, характеризующейся высокой плотностью микробных популяций (порядка 10^9 клеток/г) и большим разнообразием видов (до 106 видов бактерий и архей в 10 г) [9; 10]. В то же время лишь 1–10 % почвенных микроорганизмов можно культивировать традиционными методами. Оставшиеся 90–99 % относятся к так называемым некультивируемым видам [11; 12]. Любое антропогенное воздействие может как снижать микробное разнообразие и, как следствие, плодородие почв, так и служить селективным фактором для развития микроорганизмов, обладающих хозяйственно полезными свойствами (способность к деградации биополимеров, таких как лигнин и целлюлоза, опасных ксенобиотиков, в частности углеводородов, в т. ч. ароматической природы). Исследование ассоциации микроорганизмов, находящейся в почвах с разной антропогенной нагрузкой, помогает понять структуру микробного сообщества данной почвы, определить характер взаимодействия микроорганизмов и может помочь обнаружить новые штаммы микроорганизмов с практически полезными свойствами (например, способных деградировать сложно разлагаемые, в т. ч. токсичные соединения, продуцировать биологически активные вещества).

В связи с вышеизложенным целью исследования являлись микробиологический, молекулярно-генетический анализ и оценка деградативного потенциала микроорганизмов из почвы сельскохозяйственного назначения.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись образцы почв с различной антропогенной нагрузкой: используемые в сельскохозяйственных нуждах (три пробы почвы с рапсового

поля, отобранные на расстоянии около 50, 75 и 100 м от кольцевой автодороги г. Минска (МКАД) в осенний период в 2019 г.), а также изоляты бактерий, выделенные из данных образцов.

Среды и растворы. Учет общего числа почвенных аэробных и факультативно анаэробных гетеротрофных микроорганизмов проводили на пептонно-дрожжевом агаре (ПДА) (г/л: пептон ферментативный – 10, дрожжевой экстракт – 5, NaCl – 8, агар бактериологический – 15, рН 7,0–7,2). Для определения общего числа олигонитрофильных и азотфиксирующих микроорганизмов использовали среду Эшби; общего числа актиномицетов и микромицетов – среду Чапека [13]. Общее число целлюлолитических микроорганизмов определяли на среде М9 [14] с 0,1 % карбоксиметилцеллюлозой в качестве единственного источника углерода. Количество деструкторов углеводов, а также способность отдельных изолятов утилизировать углеводороды определяли путем высева на плотную минеральную среду М9 [14]. В качестве источников углерода использовали: гексадекан (пары), дизельное топливо (пары), октан (пары), о-ксилол (пары), толуол (пары), бензол (пары), фенол (0,1 %), нафталин (пары).

Выделение метагеномной ДНК осуществляли с использованием набора «Нуклеосорб С» (ОДО «Праймтех», Беларусь) в соответствии с рекомендациями производителя. Качество выделенной ДНК оценивали с помощью электрофореза в агарозном геле.

Для постановки полимеразной цепной реакции (ПЦР) использовали набор реагентов производства ОДО «Праймтех», Беларусь. Реакцию проводили в объеме 25 мкл. Реакционная смесь содержала 1х буфер с ионами Mg²⁺ для ДНК-полимеразы, смесь дНТФ (0,2 ммоль/л каждого нуклеотида), 0,2–0,5 мкмоль/л каждого праймера для соответствующей детерминанты, 1,25 ед. ДНК-полимеразы. При амплификации фрагментов генов *nahAc* и *nahG* в смесь также добавляли 3 % глицерина и 5 % диметилсульфоксида.

Для амплификации генов *alkB* бактерий *Acinetobacter* использовали праймеры *alkF* (GCICAIGARITIRKICAYAA) и *alkR* (GCITGITGTCISWRTGICGYTG) [15]; бактерий *Rhodococcus* и близких родов, рода *Pseudomonas* использовали праймеры *alk-H1F* (CIGIICACGAITGGICACAAGAAGG), *alk-H3R* (IGCITGITGATCIIIGTGICGCTGIAG) [16] и режим амплификации 95 °С – 5 мин. (1 цикл); 94 °С – 1 мин., 50 °С – 1 мин., 72 °С – 1 мин. (5 циклов); 94 °С – 1 мин., 55 °С – 1 мин., 72 °С – 1 мин. (30 циклов); 72 °С – 5 мин. (1 цикл). Для амплификации генов *narB* использовали праймеры *NarBForward* (ACGTGCAAGAAGGCGCGAAA), *NarBReverse* (ACGCTCCCGCGAGGCGAGAA) [17] и режим амплификации 95 °С – 5 мин. (1 цикл); 94 °С – 1 мин., 52 °С – 30 с., 72 °С – 40 с. (30 циклов); 72 °С – 5 мин. (1 цикл). Амплификацию генов *nahAc* осуществляли с использованием пары праймеров *Ac149f* (CCCYGGCGACTATGT) и *Ac1014r* (CTCRGGCATGTCTTTTC) при режиме 94 °С – 5 мин. (1 цикл); 94 °С – 30 с., 46 °С – 30 с., 72 °С – 1,5 мин. (30 циклов); 72 °С – 10 мин. (1 цикл) [18]. Для выявления генов *nahG* применялись праймеры *shc1_up* (CGGCKTTHGGTGARGTCGGTGC) и *shc1_lo* (GGCGAGGAARTAGGCGTCCTCAAG) и режимы амплификации 94 °С – 5 мин. (1 цикл); 94 °С – 1 мин., 50 °С – 1 мин., 72 °С – 1 мин. (30 циклов); 72 °С – 10 мин. (1 цикл) [19]. Наличие плазмид группы *IncP-9* определяли с помощью ПЦР с праймерами *orisF* (GCGGGAATGRGTGACTAGCG) и *orisR* (GTCTGTACCCATGTRCCG) при режиме 94 °С – 5 мин. (1 цикл); 94 °С – 30 с., 64 °С – 30 с., 72 °С – 1,5 мин. (7 циклов); 94 °С – 30 с., 68 °С – 30 с., 72 °С – 1,5 мин. (23 цикла); 72 °С – 10 мин. (1 цикл) [20]. Плазмиды группы *IncP-7* обнаруживали с использованием пары праймеров *rep7f* (CCSTATCTCACGATGCTGTA), *rep7r* (GCACAAACGGTCGTACAG) и режима 94 °С – 5 мин. (1 цикл); 94 °С – 1 мин., 50 °С – 1 мин., 72 °С – 1 мин. (30 циклов); 72 °С – 10 мин. (1 цикл) [20].

Размеры полученных ПЦР-продуктов оценивали с помощью электрофореза в агарозном геле (0,7 %).

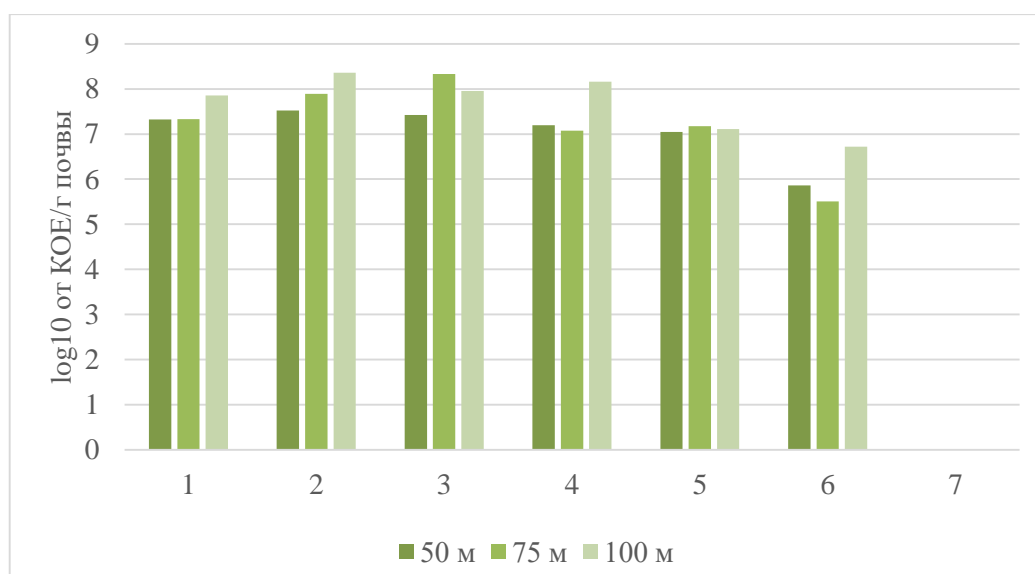
Результаты и их обсуждение

Почва богата микроорганизмами, обладающими различными свойствами и способными утилизировать широкий спектр субстратов, в который также входят и нефтепродукты. При антропогенном воздействии на окружающую среду изменяется качественный и количественный состав почвы, что влияет на ее микробиоту.

Автомобильные магистрали являются источником разнообразных загрязнителей, в т. ч. углеводородов. Для того чтобы установить, как изменяется количество микроорганизмов разных групп в зависимости от удаленности источника загрязнения, были проведены высевы из образцов почвы сельскохозяйственного назначения, взятых около МКАД на расстоянии 50, 75 и 100 м от нее.

В результате анализа данных о количественном и качественном составе культивируемых микроорганизмов (рисунок 1) установлено, что наблюдается увеличение количества микроорганизмов на расстояниях 75 и 100 м от МКАД по сравнению с более близким расположением (50 м). Это говорит о более высокой антропогенной нагрузке на почву по мере приближения к МКАД.

Количество деструкторов нефтепродуктов (для их выявления в качестве источника углерода использовалось дизельное топливо (ДТ)) было близким к общему числу гетеротрофных микроорганизмов, в то же время количество деструкторов ПАУ (на примере нафталина) было в 10–50 раз ниже общего числа гетеротрофов, а деструкторов фенола выявлено не было (рисунок 1).



- 1 – Гетеротрофные аэробные и факультативно анаэробные (среда ПДА);
 2 – Олигонитрофильные (среда Эшби); 3 – Целлюлолитические (M9 + КМЦ);
 4 – Actinomyces и микромицеты (среда Чапека); 5 – Деструкторы нефтепродуктов (M9 + ДТ);
 6 – Деструкторы нафталина (M9 + нафталин); 7 – Деструкторы фенола (M9 + фенол).

Рисунок 1 – Изменение количества микроорганизмов разных физиологических групп (представлено в виде десятичного логарифма от КОЕ/г почвы) в зависимости от расстояния от МКАД

Необходимо отметить, что культуральные методы не позволяют оценить микробного разнообразия почв и других сред в полной мере. Существует большое количество некультивируемых видов микроорганизмов, выявление которых в среде стало возможным благодаря молекулярно-генетическим методам.

Для выделения метагеномной ДНК использовали усредненную пробу почвы. ПЦР-анализ проводили со специфическими праймерами для выявления детерминант путей деградации углеводов. Для выявления алканмонооксигеназ были использованы две пары праймеров. Пара праймеров *alk-N1F* + *alk-N3R* позволяет амплифицировать участки генов *alkB* бактерий рода *Rhodococcus* и близких к ним родов, а также рода *Pseudomonas*. Пара праймеров *alkF* + *alkR* позволяет амплифицировать участки специфических генов *alk* бактерий рода *Acinetobacter*. Таким образом, в совокупности данные пары праймеров позволяют выявить в почве алканокисляющие бактерии различных систематических групп.

Как видно из таблицы 1, в образцах метагеномной ДНК выявлены детерминанты *nahG* и *nahAc*, что говорит о присутствии бактерий – деструкторов нафталина рода *Pseudomonas*. В то же время генов *narB*, характерных для нафталинутилизирующих бактерий рода *Rhodococcus*, не выявлено. Не обнаружено и плазмид групп *IncP-7* и *IncP-9*, которые нередко несут детерминанты биodeградации углеводов. Не установлено наличие генов *alkB* бактерий *Acinetobacter*, *Rhodococcus* и других, хотя деструкторы этих соединений были выявлены культуральными методами. Это может быть связано с относительно низкой плотностью их популяций.

Таблица 1 – ПЦР-анализ почвенной метагеномной ДНК

Детерминанта	Функция	Наличие детерминанты в образце
<i>alk (Acinetobacter)</i>	Кодирует алканмонооксигеназу (фермент, активирующий алканы)	–
<i>alkB (Rhodococcus</i> и др.)	Кодирует алканмонооксигеназу (фермент, активирующий алканы)	–
<i>narB</i>	Кодирует цис-нафталиндигидродиолдегидрогеназу (фермент пути деградации нафталина у бактерий рода <i>Rhodococcus</i>)	–
<i>nahAc</i>	Кодирует α -субъединицу нафталиндиоксигеназы (фермент пути деградации нафталина у бактерий рода <i>Pseudomonas</i>)	+
<i>nahG</i>	Кодирует салицилатгидроксилазу (фермент пути деградации нафталина у бактерий рода <i>Pseudomonas</i>)	+
<i>oriV IncP-9</i>	Область начала репликации плазмид группы <i>IncP-9</i> , которые зачастую несут пути биodeградации углеводов	–
<i>rep IncP-7</i>	Реп-область плазмид группы <i>IncP-7</i> , которые зачастую несут пути биodeградации углеводов	–

Примечание – – – детерминанта не выявлена, + – детерминанта выявлена.

Поскольку в исследованных образцах почвы с помощью культуральных и молекулярно-генетических методов выявлены бактерии – деструкторы углеводов различных классов – представлялось интересным изучить деградативный потенциал отдельных бактериальных изолятов с целью выявления перспективных для природоохранных биотехнологий.

Из образцов почвы на основании морфологии колоний для дальнейших исследований со среды ПДА было выделено 12 изолятов, со среды Эшби – 7, со среды М9 с КМЦ – 16 и со среды М9 с дизельным топливом – 7 изолятов. Всего было изучено 42 изолята.

В качестве субстратов были использованы: дизельное топливо (смесь углеводов: алифатические – до 10–40 %; циклоалканы – 20–60 %; ароматические – 15–30 %), алифатические углеводороды (октан, гексадекан); ароматические углеводороды и их производные (бензол, толуол, о-ксилол, фенол).

Среди 42 исследованных изолятов к утилизации углеводов способен 21 изолят. Как видно из таблицы 2, 20 изолятов использовали в качестве источника углерода гексадекан, 15 – дизельное топливо, 8 – октан, 5 – о-ксилол, 4 – толуол, 2 – бензол, фенол не утилизировал ни один из исследуемых изолятов. Это соответствует данным о том, что ароматические углеводороды труднее поддаются разложению по сравнению с алифатическими, а алифатические углеводороды с длиной цепи более 12 углеродных атомов (например, гексадекан) расщепляются проще, чем алканы с меньшей длиной цепи, поскольку алканы с короткой цепью обладают большей токсичностью [21–24].

Среди исследованных изолятов отмечают как те, которые способны к росту на алифатических и ароматических субстратах – изоляты № 15 с ПДА, № 1 с М9 + ДТ, № 15 и 16 с М9 + КМЦ, так и те, которые способны утилизировать только один класс соединений: алифатические – изоляты № 2, 4, 10, 11 со среды Эшби, № 2, 3, 4, 9.1 с М9 + ДТ, № 12 с ПДА, № 2, 3, 11, 12, 13, 14, 19 – со среды М9 + КМЦ; ароматические – изолят № 1 со среды Эшби.

Таблица 2 – Способность почвенных изолятов бактерий утилизировать углеводороды

Среда, на которой выделены изоляты	№ изолята	Способность изолятов расти на среде М9, содержащей							Всего утилизируемых субстратов
		ДТ	О	ГД	Б	Т	К	Ф	
Эшби	2, 4, 10	+	+	+	–	–	–	–	3
	1	–	–	–	+	+	+	–	3
	11	–	+	+	–	–	–	–	2
	9, 12, 13	–	–	–	–	–	–	–	0
М9 + ДТ	1	+	–	+	–	–	+	–	3
	2, 3, 4	+	–	+	–	–	–	–	2
	9	–	–	+	–	–	–	–	1
	10	–	–	–	–	–	–	–	0
ПДА	15	+	+	+	+	+	+	–	6
	12	+	–	+	–	–	–	–	2
	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 13, 14	–	–	–	–	–	–	–	0
М9 + КМЦ	15, 16	+	–	+	–	+	+	–	4
	2, 12, 14	+	+	+	–	–	–	–	3
	3	+	–	+	–	–	–	–	2
	11, 13, 19	–	–	+	–	–	–	–	1
	6, 4, 7, 8, 10, 17, 18	–	–	–	–	–	–	–	0
Всего изолятов, утилизирующих субстрат		15	8	20	2	4	5	0	–

Примечания – – – роста нет, + – активный рост; ДТ – дизельное топливо; О – октан; ГД – гексадекан; Б – бензол; Т – толуол; К – о-ксилол; Ф – фенол.

Наибольшим спектром утилизируемых субстратов обладает изолят № 15, выделенный на среде ПДА. Он использует в качестве источника углерода как алифатические, так и ароматические углеводороды. Среди исследованных субстратов изолят № 15 не растет только на среде с фенолом (0,1 %). Таким образом, изолят № 15, выделенный на среде ПДА, можно отнести к перспективным деструкторам углеводородов нефти.

Заключение

В результате проведенного микробиологического и молекулярно-генетического анализа проб почвы, подвергавшейся антропогенному воздействию разного вида (сельскохозяйственное применение, близкое расположение автомагистрали), установлено, что с ростом антропогенной нагрузки (близкое расположение автомагистрали МКАД) наблюдается снижение количества различных физиологических групп микроорганизмов в почве. ПЦР-анализ метагеномной ДНК, выделенной из почвы, позволил выявить детерминанты *nahG* и *nahAc*, что говорит о присутствии бактерий – деструкторов нафталина рода *Pseudomonas*.

Для 42 изолятов исследован спектр утилизируемых углеводородных субстратов. Из них 20 использовали в качестве источника углерода гексадекан, 15 – дизельное топливо, 8 – октан, 5 – о-ксилол, 4 – толуол, 2 – бензол, фенол не утилизировал ни один из исследуемых изолятов. Всего к утилизации углеводородов способен 21 изолят. Наибольшим спектром утилизируемых субстратов обладает изолят № 15, выделенный на среде ПДА. Он использует в качестве источника углерода как алифатические, так и ароматические углеводороды. Среди исследованных субстратов изолят № 15 не растет только на среде с фенолом (0,1 %).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заславский, М. Н. Эрозиоведение. Основы противоэрозионного земледелия / М. Н. Заславский. – М. : Высш. шк., 1987. – 376 с.
2. Янин, Е. П. Ремедиация территорий, загрязненных химическими элементами: общие подходы, правовые аспекты, основные способы / Е. П. Янин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2014. – № 3. – С. 3–105.
3. Шамраев, А. В. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды / А. В. Шамраев, Т. С. Шорина // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2009. – № 6 (100). – С. 642–645.
4. Effects of crude oil, oil components, and biodegradation on plant growth / Baek Kyung-Hwa [et al.] // Journal of Environmental Science and Health, Part A. – 2004. – Vol. 39, iss. 9. – P. 2465–2472.
5. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) / А. Н. Геннадиев [и др.] // Почвоведение. – 2015. – № 10. – С. 1195–1195.
6. Коломин, В. В. Автотранспорт как приоритетный источник загрязнения атмосферного воздуха (обзор литературы) / В. В. Коломин, В. С. Рыбкин // Естеств. науки. – 2015. – № 1. – С. 26–34.
7. Struzeski, E. J. Jr. Chemical treatment of oil spills / E. J. Struzeski Jr., R. T. Dewling // Proceedings of Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills. – 1969. – Iss. 1. – P. 217–222.
8. Obi, E. O. Techniques of Oil Spill Response in the sea / E. O. Obi, F. A. Kamgba, D. A. Obi // IOSR Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 6, iss. 1. – P. 36–41.
9. Daniel, R. The metagenomics of soil / R. Daniel // Nature Reviews Microbiology. – 2005. – Vol. 3, iss. 6. – P. 470–478.

10. Prosser, J. I. Dispersing misconceptions and identifying opportunities for the use of ‘omics’ in soil microbial ecology / J. I. Prosser // *Nature Reviews Microbiology*. – 2015. – Vol. 13, iss. 7. – P. 439–446.
11. The choice of the DNA extraction method may influence the outcome of the soil microbial community structure analysis / S. Zielinska [et al.] // *Microbiology Open*. – 2017. – Vol. 6, iss. 4. – Art. e00453.
12. Семенов, М. В. Метабаркодинг и метагеномика в почвенно-экологических исследованиях: успехи, проблемы и возможности / М. В. Семенов // *Журн. общ. биологии*. – 2019. – Т. 80, № 6. – С. 403–417.
13. Звягинцев, Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии : учеб. пособие / Д. Г. Звягинцев. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 304 с.
14. Миллер, Дж. Эксперименты в молекулярной генетике / Дж. Миллер ; пер. с англ. Ю. Н. Зографа [и др.] ; под ред. и с предисл. С. И. Алиханяна. – М. : Мир, 1976. – 436 с.
15. Kloos, K. A new method for the detection of alkane-monoxygenase homologous genes (alkB) in soils based on PCR-hybridization / K. Kloos, J. Ch. Munch, M. Schloter // *Journal of Microbiological Methods*. – 2006. – Vol. 66, iss. 3. – P. 486–496.
16. Impact of seasonal variations and nutrient inputs on nitrogen cycling and degradation of hexadecane by replicated river biofilms / M. R. Chénier [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2003. – Vol. 69, nr. 9. – P. 5170–5177.
17. Detection of genes for alkane and naphthalene catabolism in *Rhodococcus* sp. strain 1BN / V. Andreoni [et al.] // *Environmental Microbiology*. – 2000. – Vol. 2, iss. 5. – P. 572–577.
18. Coexistence of two distinct copies of naphthalene degradation genes in *Pseudomonas* strains isolated from the western Mediterranean region / M. Ferrero [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2002. – Vol. 68, nr. 2. – P. 957–962.
19. Разнообразие генетических систем биодеградации нафталина у штаммов *Pseudomonas fluorescens* / Т. Ю. Измалкова [и др.] // *Микробиология*. – 2005. – Т. 74, № 1. – С. 70–78.
20. PCR primers for detection and characterization of IncP-9 plasmids / R. Krasowiak [et al.] // *FEMS Microbiology Ecology*. – 2002. – Vol. 42, iss. – P. 217–225.
21. Degradation potential of alkanes by diverse oil-degrading bacteria from deep-sea sediments of Haima cold seep areas, South China Sea / Lyu Lina [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 920067.
22. Nzila, A. Current Status of the Degradation of Aliphatic and Aromatic Petroleum Hydrocarbons by Thermophilic Microbes and Future Perspectives / A. Nzila // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2018. – Vol. 15, iss. 12. – Art. 2782.
23. Hassanshahian, M. Isolation and characterization of crude oil degrading bacteria from the Persian Gulf (Khorramshahr provenance) / M. Hassanshahian, M. S. Zeynalipour, F. H. Musa // *Marine Pollution Bulletin*. – 2014. – Vol. 82, iss. 1–2. – P. 39–44.
24. Assessing environmental drivers of microbial communities in estuarine soils of the Aconcagua River in Central Chile / S. Fuentes // *FEMS Microbiology Ecology*. – 2015. – Vol. 91, iss. 10. – Art. fiv110.

REFERENCES

1. Zaslavskij, M. N. Eroziivedenije. Osnovy protivooerozionnogo ziemliedeliija / M. N. Zaslavskij. – М. : Vysh. shk., 1987. – 376 s.
2. Yanin, Ye P. Riemiediacija tierritorij, zagriaznennykh khimichieskimi elimentami: obshchije podkhody, pravovyje aspiekty, osnovnyje sposoby / E. P. Yanin // *Problemy okruzhajushchiej sriedy i prirodnykh riesursov*. – 2014. – № 3. – S. 3–105.

3. Shamrajev, A. V. Vliianije nefti i neftieproduktov na razlichnyje komponenty okruzhajushchiej sriedy / A. V. Shamrajev, T. S. Shorina // Viest. Orenburg. gos. un-ta. – 2009. – № 6 (100). – S. 642–645.
4. Effects of crude oil, oil components, and biodegradation on plant growth / Baek Kyung-Hwa [et al.] // Journal of Environmental Science and Health, Part A. – 2004. – Vol. 39, iss. 9. – P. 2465–2472.
5. Uglievodorody v pochvakh: proiskzhozhdienije, sostav, poviedienije (obzor) / A. N. Gienadijev [i dr.] // Pochvoviedenije. – 2015. – № 10. – S. 1195–1195.
6. Kolomin, V. V. Avtotransport kak prioritietnyj istochnik zagriaznenija atmosfernogo vozdukhha (obzor literatury) / V. V. Kolomin, V. S. Rybkin // Esteistv. nauki. – 2015. – № 1. – S. 26–34.
7. Struzeski, E. J. Jr. Chemical treatment of oil spills / E. J. Struzeski Jr., R. T. Dewling // Proceedings of Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills. – 1969. – Iss. 1. – P. 217–222.
8. Obi, E. O. Techniques of Oil Spill Response in the sea / E. O. Obi, F. A. Kamgba, D. A. Obi // IOSR Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 6, iss. 1. – P. 36–41.
9. Daniel, R. The metagenomics of soil / R. Daniel // Nature Reviews Microbiology. – 2005. – Vol. 3, iss. 6. – P. 470–478.
10. Prosser, J. I. Dispersing misconceptions and identifying opportunities for the use of ‘omics’ in soil microbial ecology / J. I. Prosser // Nature Reviews Microbiology. – 2015. – Vol. 13, iss. 7. – P. 439–446.
11. The choice of the DNA extraction method may influence the outcome of the soil microbial community structure analysis / S. Zielinska [et al.] // Microbiology Open. – 2017. – Vol. 6, iss. 4. – Art. e00453.
12. Sieimioenov, M. V. Mietabarkoding i mietagenomika v pochvienno-ekologichieskkih issliedovanijakh: uspiekkhi, probliemy i vozmozhnosti / M. V. Siemionov // Zhurn. obshch. biologii. – 2019. – T. 80, № 6. – S. 403–417.
13. Zviaginev, D. G. Mietody pochviennoj mikrobiologii i biokhimii : uchieb. posobije / D. G. Zviaginev. – M. : Izd-vo MGU, 1992. – 304 s.
14. Millier, Dzh. Ekspierimenty v moliekuliarnoj gienetike / Dzh. Miller ; pier. s angl. Yu. N. Zografa [i dr.] ; pod ried. i s priedisl. S. I. Alikhaniana. – M. : Mir, 1976. – 436 s.
15. Kloos, K. A new method for the detection of alkane-monooxygenase homologous genes (alkB) in soils based on PCR-hybridization / K. Kloos, J. Ch. Munch, M. Schloter // Journal of Microbiological Methods. – 2006. – Vol. 66, iss. 3. – P. 486–496.
16. Impact of seasonal variations and nutrient inputs on nitrogen cycling and degradation of hexadecane by replicated river biofilms / M. R. Chénier [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. – 2003. – Vol. 69, nr. 9. – P. 5170–5177.
17. Detection of genes for alkane and naphthalene catabolism in *Rhodococcus* sp. strain 1BN / V. Andreoni [et al.] // Environmental Microbiology. – 2000. – Vol. 2, iss. 5. – P. 572–577.
18. Coexistence of two distinct copies of naphthalene degradation genes in *Pseudomonas* strains isolated from the western Mediterranean region / M. Ferrero [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. – 2002. – Vol. 68, nr. 2. – P. 957–962.
19. Raznoobrazije gienetichieskikh sistem biodiegracii naftalina u shtammov *Pseudomonas fluorescens* / T. Yu. Izmalkova [i dr.] // Mikrobiologija. – 2005. – T. 74, № 1. – S. 70–78.
20. PCR primers for detection and characterization of IncP-9 plasmids / R. Krasowiak [et al.] // FEMS Microbiology Ecology. – 2002. – Vol. 42, iss. – P. 217–225.
21. Degradation potential of alkanes by diverse oil-degrading bacteria from deep-sea sediments of Haima cold seep areas, South China Sea / Lyu Lina [et al.] // Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 13. – Art. 920067.

22. Nzila, A. Current Status of the Degradation of Aliphatic and Aromatic Petroleum Hydrocarbons by Thermophilic Microbes and Future Perspectives / A. Nzila // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2018. – Vol. 15, iss. 12. – Art. 2782.

23. Hassanshahian, M. Isolation and characterization of crude oil degrading bacteria from the Persian Gulf (Khorramshahr provenance) / M. Hassanshahian, M. S. Zeynalipour, F. H. Musa // Marine Pollution Bulletin. – 2014. – Vol. 82, iss. 1–2. – P. 39–44.

24. Assessing environmental drivers of microbial communities in estuarine soils of the Aconcagua River in Central Chile / S. Fuentes // FEMS Microbiology Ecology. – 2015. – Vol. 91, iss. 10. – Art. fiv110.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 14.09.2023

УДК 581.143.6:582.594.2

Светлана Михайловна Ленивко¹, Артур Сергеевич Карунос²

¹канд. биол. наук, доц., доц. каф. зоологии и генетики

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²магистрант 2-го года обучения факультета естествознания

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Svetlana Lenivko¹, Artur Karunos²

¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Zoology and Genetics
of Brest State A. S. Pushkin University

²2-nd Year Master's Student of the Faculty of Natural Sciences
of Brest State A. S. Pushkin University

[e-mail: zoology@brsu.brest.by](mailto:zoology@brsu.brest.by)

ИНДУКЦИЯ СОМАТИЧЕСКОГО ЭМБРИОГЕНЕЗА У РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛАНТОВ ФАЛЕНОПСИСА ГИБРИДНОГО

Проведена оценка индукции прямого соматического эмбриогенеза в тканях листа и корня *Phalaenopsis hybridum hort.* в различных вариантах гормональной регуляции. Установлено, что синтетический регулятор роста тидиазурон с цитокинин-ауксиновым типом действия проявляет большую эффективность в формировании соматических эмбриоидов, чем совместное действие цитокинина и ауксина. Выявлено, что фрагменты корней сеянцев *in vitro* фаленопсиса гибридного, по сравнению с листовыми эксплантами имеют больший морфогенный отклик по частоте прямого соматического эмбриогенеза в различных вариантах гормональной регуляции.

Ключевые слова: соматический эмбриогенез, тидиазурон, 6-бензиламинопурин, индол-3-масляная кислота, листовые и корневые экспланты, *Phalaenopsis hybridum hort.*

Induction of Somatic Embryogenesis in Various of Phalaenopsis Hybrid of the Explants

The induction of direct somatic embryogenesis in leaf and root tissues of Phalaenopsis hybridum hort was assessed. in various variants of hormonal regulation. It has been established that the synthetic growth regulator thidiazuron with a cytokinin-auxin type of action is more effective in the formation of somatic embryoids than the combined action of cytokinin and auxin. It was revealed that fragments of roots of Phalaenopsis hybridum hort seedlings in vitro in comparison with leaf explants, have a greater morphogenic response in terms of frequencies of direct somatic embryogenesis in various variants of hormonal regulation.

Key words: somatic embryogenesis, thidiazuron, 6-benzylaminopurine, indole-3-butyric acid, leaf and root explants, *Phalaenopsis hybridum hort.*

Введение

Соматический эмбриогенез – процесс, при котором соматические (незиготические) клетки формируют зародышеподобные структуры, которые, проходя через характерные стадии эмбрионального развития, формируют новые растения, – не теряет своей перспективности и требует проведения дальнейших исследований. Многие виды растений хранят в себе потенциальную способность к соматическому эмбриогенезу, однако для образования соматических эмбриоидов (СЭ) необходимы специфические условия *in vitro*. Развитие соматических зародышей орхидных проходит через формирование цилиндрической эмбриональной структуры с апикальной меристемой, из которой, образуется протокормоподобное тело, а в дальнейшем – проросток [1]. Процесс соматического эмбриогенеза можно разделить на две фазы: первую, где клетки приобретают эмбрионную компетенцию и в такой конституции пролиферируют, и вторую, на протяжении которой пролиферирующие клетки дифференцируются в соматические зародыши. Путь прямого соматического эмбриогенеза (ПСЭ), не связанный с образованием каллуса, яв-

ляется более востребованным при разработке технологий получения селекционно-ценного растительного материала. Основными индукторами дифференциации СЭ и дальнейшей регенерации растений из них являются специфически необходимые регуляторы роста растений [2].

Основываясь на доступной нам литературе, можно отметить, что на успешную индукцию ПСЭ у представителей семейства *Orchidaceae* Juss. влияют такие регуляторы роста, как цитокинины 6-бензиламинопурина (БА), 2-изопентениладенин и цитокининоподобное соединение тидиазурон (ТДЗ) [3–7]. Для индукции ПСЭ рекомендуется применять БА в концентрации от 0,5 до 20 мг/л [8–11], а рекомендуемые концентрации ТДЗ находятся в диапазоне от 0,25 до 3,0 мг/л [12, 13]. В экспериментальных работах по индукции ПСЭ также практикуется использование комбинации цитокининов и ауксинов, причем наиболее часто применяется ауксин НУК (нафтилуксусная кислота), концентрация которого варьирует в пределах от 0,1 до 1 мг/л [14]. В целом ауксины в культуре *in vitro* необходимы для стимулирования образования и пролиферации протокормоподобных тел, однако ингибируют их конверсию в проростки [15]. Положительное влияние на ПСЭ оказывает и модифицирование питательных сред посредством введения органических компонентов, таких как мальтоза, глутамин, пептон, дрожжевой экстракт, картофельный или банановый экстракт, березовый или томатный сок, эндосперм кокоса [16–18]. Перспективность разработки вопросов, связанных с гормональной индукцией соматического эмбриогенеза, связана с возможностью создания эффективной системы регенерации растений в условиях *in vitro*.

Цель исследования – оценить индукцию ПСЭ в тканях листа и корня фаленопсиса гибридного в различных вариантах гормональной регуляции.

Материал и методы исследования

Объектами исследований явились два типа зрелых эксплантов: листья трех порядков (апикальный, срединный и базальный) и фрагменты корней (апикальный, срединный и базальный) из ювенильных растений асептических семян *Phalaenopsis hybridum hort.*, которые к моменту экспериментов имели по три листа и 2–3 корня. Выбор объектов исследования был определен имеющимся в литературе данными о способности их тканей индуцировать протокормоподобные тела [19], а также доступностью в большом количестве для проведения экспериментальных работ и возможностью изолирования без существенного нарушения развития исходного материала.

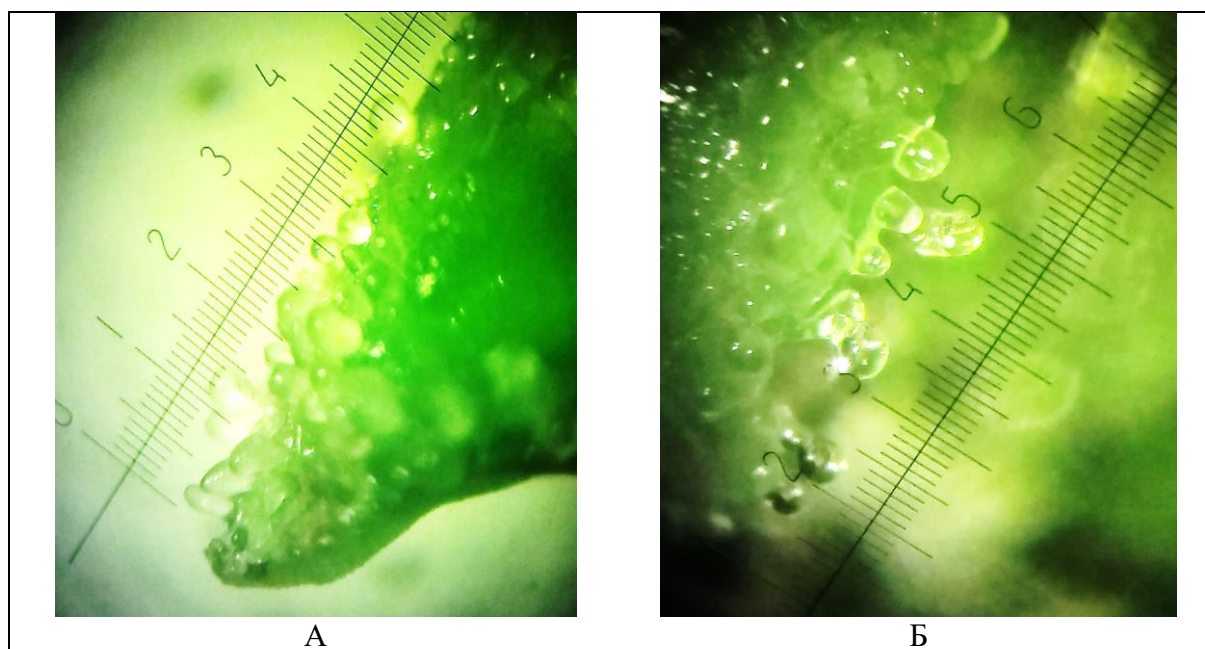
Эксперимент проводился в три этапа. На первом этапе варианты опыта различались различным содержанием тидиазурана (ТДЗ): 0,5, 1, 2 и 3 мг/л. На втором этапе варианты питательных сред были дополнены фитогормонами 6-бензиламинопурином (БА), индолил-3-масляной кислотой (ИМК) и ТДЗ в следующих концентрациях (мг/л): 0,5 БА + 0,01 ИМК (1-й вариант); 0,5 БА + 0,1 ИМК (2-й вариант); 1,5 ТДЗ (3-й вариант); 0,5 БА (4-й вариант); 0,1 БА + 0,01 ИМК (5-й вариант). За основу была взята среда Мурасиге и Скуга, содержащая макро- и микроэлементы в половинной концентрации.

Индукция морфогенетических процессов, приводящих к ПСЭ, осуществлялась в камере для роста растений KBW 400 при 16-ти часовом фотопериоде с интенсивностью освещения 3000 лк и постоянной температуре + 19 °С. Морфогенетическая реакция эксплантов фиксировалась с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10.

Статистическую обработку полученных результатов проводили согласно общепринятым методам биологической статистики с использованием программы Excel. Достоверность значимости различий между вариантами эксперимента определяли по t-критерию Стьюдента. Дисперсионный анализ применяли для комплексной оценки полученных средних значений по вариантам опыта, установления значимости и доли влияния факторов на их изменчивость.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследований решалась задача по определению оптимальной концентрации ТДЗ для индукции ПСЭ на эксплантах *Phalaenopsis hybridum hort.* Первые СЭ были отмечены на 20-е сутки эксперимента на апикальных листовых эксплантах и на трансверсальных срезах базальных фрагментов корней (рисунок 1).



А – на листовых пластинках; Б – на фрагментах корней

Рисунок 1 – Первичные СЭ на эксплантах *Phalaenopsis hybridum hort.*

Минимальные частоты ПСЭ листовых эксплантов были зафиксированы на базальных фрагментах листовых эксплантов и апикальных фрагментах корней на питательной среде с ТДЗ в концентрации 0,5 мг/л и составили 20,0 % и 32,0 % соответственно на 30-е сутки эксперимента. На 60-е сутки эксперимента указанные экспланты также сохранили самую низкую отзывчивость к условиям культивирования.

Таблица 1 – Частота формирования первичных СЭ под влиянием различных концентраций ТДЗ у эксплантов *Phalaenopsis hybridum hort.*, %

Тип экспланта	Концентрация ТДЗ, мг/л				Время
	0,5	1	2	3	
Апикальный лист	37,0 ± 12,5	46,0 ± 12,9	54,0 ± 12,9	57,0 ± 12,8	30-е сутки
	44,0 ± 11,4	62,0 ± 12,5*	74,0 ± 11,3*	83,0 ± 9,7*	60-е сутки
Средний лист	30,0 ± 11,8	41,0 ± 12,7	47,0 ± 12,9	49,0 ± 12,9	30-е сутки
	42,0 ± 12,7	57,0 ± 12,8	68,0 ± 12,0	79,0 ± 10,5*	60-е сутки
Базальный лист	20,0 ± 10,3	32,0 ± 12,0	35,0 ± 12,3	45,0 ± 12,8	30-е сутки
	30,0 ± 11,8	43,0 ± 12,8	56,0 ± 12,8	59,0 ± 12,7	60-е сутки
Апикальный фрагмент корня	32,0 ± 12,0	43,0 ± 12,8	49,0 ± 12,9	53,3 ± 12,9	30-е сутки
	43,0 ± 12,8	59,0 ± 12,7	71,0 ± 11,7	77,0 ± 10,9*	60-е сутки
Средний фрагмент корня	40,0 ± 12,6	49,0 ± 12,9	57,0 ± 12,8	62,0 ± 12,5	30-е сутки
	50,0 ± 12,9	67,0 ± 12,1	79,0 ± 10,5*	85,0 ± 9,2*	60-е сутки
Базальный фрагмент корня	40,0 ± 12,6	61,0 ± 12,7	65,0 ± 12,3	64,0 ± 12,4	30-е сутки
	60,0 ± 12,5	78,0 ± 10,7	84,0 ± 9,5*	92,0 ± 7,0*	60-е сутки

Примечание – * – достоверно по сравнению с концентрацией 0,5 мг/л при $P \leq 0,05$.

Частоты ответной морфогенетической реакции в виде формирования первичных СЭ на срезах тканей апикальных листьев были существенно выше во всех вариантах опыта по сравнению с ТДЗ в концентрации 0,5 мг/л на 60-е сутки. При этом наиболее высокие показатели на 30-е и 60-е сутки культивирования зарегистрированы при культивировании апикальных листьев в двух вариантах опыта: 54,0 и 74,0 % соответственно на среде с ТДЗ в концентрации 2 мг/л, 57,0 и 83,0 % на среде с ТДЗ в концентрации 3 мг/л. Частота ПСЭ на средних листьях была существенно выше в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 3 мг/л на 60-е сутки культивирования по сравнению с ТДЗ в концентрации 0,5 мг/л и составляла 79,0 %. Базальные листья, используемые в качестве эксплантов, существенно не различались по частоте морфогенетического отклика на испытанные концентрации ТДЗ.

Частота ПСЭ на апикальных фрагментах корней была значительно выше на 60-е сутки в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 3 мг/л (по сравнению с ТДЗ в концентрации 0,5 мг/л) на 34 %. Высоким оказался регистрируемый показатель и в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 2 мг/л (71,0 %), однако статистически его достоверность не была установлена. Морфогенетическая активность средних фрагментов корней оказалась существенной при содержании в питательной среде ТДЗ в количестве 2 и 3 мг/л на 60-е сутки. Так частота зафиксированной морфогенетической реакции была на уровне 85,0 % в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 3 мг/л и 79,0 % в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 2 мг/л по сравнению с ТДЗ в концентрации 0,5 мг/л. Аналогичная реакция на 60-е сутки культивирования наблюдалась у базальных фрагментов корней фаленопсиса с максимумом частоты ПСЭ 92,0 % в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 3 мг/л и 84,0 % в варианте опыта с ТДЗ в концентрации 2 мг/л.

Таким образом, нами установлено, что из трех типов листовых эксплантов наиболее отзывчивым на условия культивирования оказался апикальный лист. Из трех типов корневых эксплантов наиболее выраженный ПСЭ был отмечен у базальных фрагментов. Для статистического выяснения закономерностей изменчивости формирования СЭ под влиянием ТДЗ у *Phalaenopsis hybridum hort.* в системе «концентрация – тип экспланта» проведен двухфакторный дисперсионный анализ, по результатам которого была рассчитана доля влияния фактора, представленная в таблице 2.

Таблица 2 – Доля влияния фактора в изменчивости частоты ПСЭ у *Phalaenopsis hybridum hort.*, %

Источник вариации	Листовые экспланты		Корневые экспланты	
	30-е сутки	60-е сутки	30-е сутки	60-е сутки
Тип экспланта	38,3	26,6	22,0	11,4
Концентрация ТДЗ	59,9	72,2	74,0	86,6
Случайные отклонения	1,8	1,2	4,0	1,9

Дисперсионный анализ подтвердил наличие достоверных различий по частоте формирования СЭ у *Phalaenopsis hybridum hort.* как типа экспланта, так и концентрации ТДЗ, причем последний фактор оказался определяющим в индукции ПСЭ. Так, доля влияния фактора «концентрации ТДЗ» в варьировании данного показателя оказалась более 50 % при культивировании листовых и корневых эксплантов на протяжении всего эксперимента.

На втором этапе проводимых исследований решалась задача по оценке интенсивности морфогенного отклика на эксплантах *Phalaenopsis hybridum hort.* различного морфо-анатомического генезиса по частоте ПСЭ, индуцируемого различными экзогенными синтетическими морфорегуляторами. Эксперимент был проведен для расширения

спектра эффективных регуляторов роста в отношении ПСЭ у зрелых эксплантов фаленопсиса гибридного.

Частота формирования СЭ в различных вариантах гормональной регуляции у двух типов зрелых эксплантов *Phalaenopsis hybridum hort.* на 30-е сутки эксперимента представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Частота формирования СЭ (%) в различных вариантах гормональной регуляции у эксплантов *Phalaenopsis hybridum hort.*

Тип экспланта	Варианты эксперимента				
	1	2	3	4	5
	0,5 БА + 0,01 ИМК	0,5 БА + 0,1 ИМК	1,5 ТДЗ	0,5 БА	0,1 БА + 0,01 ИМК
Апикальный лист	55,6 ± 11,7	52,4 ± 10,9	42,0 ± 11,3	0	47,4 ± 11,5 ^a
Средний лист	41,7 ± 10,1	47,6 ± 10,9	50,0 ± 11,2	4,2 ± 4,1 ^{b*}	37,5 ± 12,1
Базальный лист	0	34,8 ± 9,9 ^b	52,4 ± 10,9	16,7 ± 7,6 ^{b*}	40,9 ± 10,5
Апикальный фрагмент корня	30,6 ± 7,7	40,0 ± 8,9 ^b	40,0 ± 8,9 ^a	20,6 ± 6,9	13,6 ± 7,3 ^b
Средний фрагмент корня	35,3 ± 11,6*	68,4 ± 10,7*	40,0 ± 9,8	40,9 ± 10,5 ^a	21,0 ± 7,1*
Базальный фрагмент корня	50,0 ± 10,7	77,8 ± 8,0 ^{a*}	73,9 ± 9,2 ^{b*}	27,8 ± 10,6*	36,4 ± 10,3

Примечание – ^{a,b} – типы эксплантов, между которыми установлены достоверные различия при $P \leq 0,05$ в пределах варианта эксперимента; * – достоверно по сравнению с вариантами эксперимента при $P \leq 0,05$ в пределах одного типа экспланта.

Показатели частоты ПСЭ в 1-м варианте эксперимента варьировали от 30,6 % у апикального фрагмента корня до 55,6 % у апикального листа, при этом формирование эмбриоидов не было отмечено у базального листа. Существенной разницы между типами эксплантов по показателям ПСЭ не наблюдалось.

Во 2-м варианте эксперимента частота ПСЭ варьировала от 34,8 % у базального листа до 77,8 % у базального фрагмента корня. Установлена статистически значимая разница только между максимальным значением частоты формирования эмбриоидов у базального фрагмента корня и двумя типами эксплантов: апикальным фрагментом корня (40,0 %) и базальным листом (34,8 %).

В 3-м варианте эксперимента существенных различий по регистрируемому показателю в пределах листовых эксплантов не установлено, по-видимому, из-за небольшой вариации средних значений: от 42,0 % у апикального листа до 52,4 % у базального листа. В пределах корневых эксплантов существенно различались частоты ПСЭ у апикального (40,0 %) и базального (73,9 %) фрагментов корней.

Наибольшая изменчивость полученных данных наблюдалась в 4-м варианте эксперимента. Так, частота ПСЭ варьировала от 4,2 % у среднего листа до 40,9 % у среднего фрагмента корня, а у апикального листа формирование СЭ не было отмечено. Существенная разница частот ПСЭ была зафиксирована между максимальным значением частоты формирования эмбриоидов у среднего фрагмента корня и двумя типами эксплантов: базальным (16,7 %) и средним листом (4,2 %).

В 5-м варианте эксперимента было отмечена существенная разница между эксплантами, представленными апикальным листом с наибольшей частотой формирования эмбриоидов (47,4 %) и апикальным фрагментом корня, у которого зафиксировано наименьшее значение частоты (13,6 %).

Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил наличие достоверного влияния на частоту формирования СЭ у *Phalaenopsis hybridum hort.* только варианта питательной среды. Так, доля влияния гормональной регуляции в варьировании данного показателя составила 43,8 %.

Таким образом, подтверждена эффективность ТДЗ в концентрации 1,5 мг/л, а также установлена результативность совместного влияния БА в концентрации 0,5 мг/л и ИМК в концентрации 0,1 мг/л на формирование СЭ на испытанных типах эксплантов фаленопсиса гибридного.

Заклучение

В ходе первого этапа исследования выявлено усиление морфогенетической активности при повышении концентрации ТДЗ – синтетического регулятора с цитокинино-ауксиновым типом действия – с 0,5 до 3 мг/л, при этом значительно более высокий морфогенный отклик зафиксирован под влиянием ТДЗ в концентрациях 2 и 3 мг/л. Обнаружено, что отзывчивость на испытанные концентрации ТДЗ снижалась во всех вариантах опыта у листовых эксплантов в ряду «апикальный лист > средний лист > базальный лист», а частота ПСЭ у корневых эксплантов уменьшалась в трех вариантах опыта в ряду «базальный фрагмент > средний фрагмент > апикальный фрагмент». Наибольшие значения частот ПСЭ наблюдались под влиянием ТДЗ в концентрации 3 мг/л на базальном (92,0 %), среднем (85,0 %) фрагментах корня и апикальном листе (83,0 %), а также под влиянием ТДЗ в концентрации 2 мг/л на базальном фрагменте корня (84,0 %). Проведенный дисперсионный анализ полученных результатов позволил установить достоверное влияние на частоту ПСЭ у фаленопсиса гибридного как концентрации ТДЗ, так и типа экспланта. При этом доля влияния фактора «концентрация» возрастала, а фактора «тип экспланта» снижалась с 30-х к 60-м суткам эксперимента. Второй этап исследования показал, что наибольшие значения частот ПСЭ наблюдались под влиянием сочетания гормонов БА в концентрации 0,5 мг/л и ИМК в концентрации 0,1 мг/л на среднем (68,4 %) и базальном (77,8 %) фрагментах корня и под влиянием ТДЗ в концентрации 1,5 мг/л на базальном фрагменте корня (73,9 %). Дисперсионный анализ подтвердил существенную роль гормональной регуляции в индукции ПСЭ.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что синтетический регулятор роста ТДЗ с цитокинин-ауксиновым типом действия проявляет большую эффективность в формировании СЭ, чем совместное действие цитокинина и ауксина, а фрагменты корней сеянцев *in vitro* фаленопсиса гибридного имеют больший морфогенный отклик по частоте ПСЭ в различных вариантах гормональной регуляции. Представленные результаты могут послужить основой для разработки эффективной системы масштабного производства востребованных на рынке цветов растений *Phalaenopsis hybridum hort.* из зрелых эксплантов в Республике Беларусь, а также могут быть использованы для моделирования условий результативной мультипликации путем ПСЭ *in vitro* уникальных автохтонных видов семейства Орхидных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee, Y. I. Orchid protocorm-like bodies are somatic embryos / Y. I. Lee, S. T. Hsu, E. C. Yeung // *Am. J. Bot.* – 2013. – Vol. 100. – P. 2121–2131.
2. Митрофанова, И. В. Соматический эмбриогенез как система *in vitro* размножения культурных растений / И. В. Митрофанова // *Физиология и биохимия культуры растений.* – 2009. – Т. 41, № 6. – С. 496–508.

3. Somatic embryogenesis from stem thin cell layers of *Dendrobium aqueum* Lindl. / S. Parthibhan [et al.] // *Biologia Plantarum*. – 2018. – Vol. 62. – P. 439–450.
4. Zanello, C. A. PLBs induction and clonal plantlet regeneration from leaf segment of commercial hybrids of *Phalaenopsis* / C. A. Zanello, J. C. Cardoso // *The J. of Horticultural Science and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 94. – P. 627–631.
5. Indução e histologia de embriões somáticos primários e secundários do híbrido *Phalaenopsis* Classic Spotted Pink (Orchidaceae) / C. Ulisses [et al.] // *Acta biol. Colomb.* – 2016. – Vol. 21. – P. 571–578.
6. Chen, Y. Effects of thidiazuron and N6-benzylaminopurine on shoot regeneration of *Phalaenopsis* / Y. Chen, C. Piluek // *Plant Growth Regul.* – 1995. – Vol. 16. – P. 99–101.
7. Chen, Y. C. A reliable protocol for plant regeneration from callus culture of *Phalaenopsis* / Y. C. Chen, C. Chang, W. C. Chang // *In vitro cell. dev. biol.* – 2000. – Vol. 36. – P. 420–423.
8. Ernst, R. Effects of thidiazuron on in vitro propagation of *Phalaenopsis* and *Doritaenopsis* (Orchidaceae) / R. Ernst // *Plant Cell Tiss. and Org. Cult.* – 1994. – Vol. 39. – P. 273–275.
9. The influence of thidiazuron on direct somatic embryo formation from various types of explant in *Phalaenopsis amabilis* L. ‘Blume’ orchid / W. Mose [et al.] // *HAYATI J. of Biosciences*. – 1992. – Vol. 24. – P. 201–205.
10. Gow, W. Enhancement of direct somatic embryogenesis and plantlet growth from leaf explants of *Phalaenopsis* by adjusting culture period and explant length / W. Gow, J. Chen, W. Chang // *Acta Physiol. Plant.* – 2010. – Vol. 32. – P. 621–627.
11. Duan, J. X. In vitro propagation of *Phalaenopsis* via culture of cytokinins-induced nodes / J. X. Duan, H. Chen, S. J. Yazawa // *Plant Growth Regul.* – 1996. – Vol. 15. – P. 133–137.
12. Efficient in vitro culture protocols for propagating *Phalaenopsis* ‘Cool Breeze’ / K. Balilashaki [et al.] // *Plant Tiss. Cult. and Biotechnology*. – 1992. – Vol. 24. – P. 191–203.
13. Chen, J. T. Direct somatic embryogenesis from leaf explants of *Oncidium* ‘Gower Ramsey’ and subsequent plant regeneration / J. T. Chen, C. Chang, W. C. Chang // *Plant Cell Rep.* – 1999. – Vol. 19. – P. 143–149.
14. Chen, J. T. Effects of auxins and cytokinins on direct somatic embryogenesis from leaf explants of *Oncidium* ‘Gower Ramsey’ / J. T. Chen, W. C. Chang // *Plant Growth Regul.* – 2001. – Vol. 34. – P. 229–232.
15. Callus induction and somatic embryogenesis of *Phalaenopsis* / Y. Ishii [et al.] // *Plant Cell Rep.* – 1998. – Vol. 17. – P. 446–450.
16. Micropropagation of *Phalaenopsis* ‘R11 x R10’ through somatic embryogenesis method / F. Antensari [et. al.] // *Asian J. of Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 2. – P. 145–150.
17. Islam, M. O. Effects of sucrose, maltose and sorbitol on callus growth of *Phalaenopsis*, *Doritaenopsis* and *Neofinetia* / M. O. Islam, S. Ichihashi // *J. Japan Soc. Hortic. Sci.* – 1999. – Vol. 68. – P. 1124–1131.
18. Tokuhara, K. Induction of embryogenic callus and cell suspension culture from shoot tips excised from flower stalk buds of *Phalaenopsis* (Orchidaceae) / K. Tokuhara, M. Mii // *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* – 2001. – Vol. 37. – P. 457–461.
19. *Phalaenopsis* LEAFY COTYLEDON1-induced somatic embryonic structures are morphologically distinct from protocorm-like bodies / J. C. Chen [et. al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – P. 1594.

REFERENCES

1. Lee, Y. I. Orchid protocorm-like bodies are somatic embryos / Y. I. Lee, S. T. Hsu, E. C. Yeung // *Am. J. Bot.* – 2013. – Vol. 100. – P. 2121–2131.

2. Mitrofanova, I. V. Somatichieskij embriogenez kak sistiema in vitro razmnozhenija kul'turnykh rastienij / I. V. Mitrofanova // Fiziologija i biochimija kul'tury rastienij. – 2009. – T. 41, № 6. – P. 496–508.
3. Somatic embryogenesis from stem thin cell layers of *Dendrobium aqueum* Lindl. / S. Parthibhan [et al.] // *Biologia Plantarum*. – 2018. – Vol. 62. – P. 439–450.
4. Zanello, C. A. PLBs induction and clonal plantlet regeneration from leaf segment of commercial hybrids of *Phalaenopsis* / C. A. Zanello, J. C. Cardoso // *The J. of Horticultural Science and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 94. – P. 627–631.
5. Indução e histologia de embriões somáticos primários e secundários do híbrido *Phalaenopsis* Classic Spotted Pink (Orchidaceae) / C. Ulisses [et al.] // *Acta biol. Colomb.* – 2016. – Vol. 21. – P. 571–578.
6. Chen, Y. Effects of thidiazuron and N6-benzylaminopurine on shoot regeneration of *Phalaenopsis* / Y. Chen, C. Piluek // *Plant Growth Regul.* – 1995. – Vol. 16. – P. 99–101.
7. Chen, Y. C. A reliable protocol for plant regeneration from callus culture of *Phalaenopsis* / Y. C. Chen, C. Chang, W. C. Chang // *In vitro cell. dev. biol.* – 2000. – Vol. 36. – P. 420–423.
8. Ernst, R. Effects of thidiazuron on in vitro propagation of *Phalaenopsis* and *Doritaenopsis* (Orchidaceae) / R. Ernst // *Plant Cell Tiss. and Org. Cult.* – 1994. – Vol. 39. – P. 273–275.
9. The influence of thidiazuron on direct somatic embryo formation from various types of explant in *Phalaenopsis amabilis* L. 'Blume' orchid / W. Mose [et al.] // *HAYATI J. of Biosciences*. – 1992. – Vol. 24. – P. 201–205.
10. Gow, W. Enhancement of direct somatic embryogenesis and plantlet growth from leaf explants of *Phalaenopsis* by adjusting culture period and explant length / W. Gow, J. Chen, W. Chang // *Acta Physiol. Plant.* – 2010. – Vol. 32. – P. 621–627.
11. Duan, J. X. In vitro propagation of *Phalaenopsis* via culture of cytokinins-induced nodes / J. X. Duan, H. Chen, S. J. Yazawa // *Plant Growth Regul.* – 1996. – Vol. 15. – P. 133–137.
12. Efficient in vitro culture protocols for propagating *Phalaenopsis* 'Cool Breeze' / K. Balilashaki [et al.] // *Plant Tiss. Cult. and Biotechnology*. – 1992. – Vol. 24. – P. 191–203.
13. Chen, J. T. Direct somatic embryogenesis from leaf explants of *Oncidium* 'Gower Ramsey' and subsequent plant regeneration / J. T. Chen, C. Chang, W. C. Chang // *Plant Cell Rep.* – 1999. – Vol. 19. – P. 143–149.
14. Chen, J. T. Effects of auxins and cytokinins on direct somatic embryogenesis from leaf explants of *Oncidium* 'Gower Ramsey' / J. T. Chen, W. C. Chang // *Plant Growth Regul.* – 2001. – Vol. 34. – P. 229–232.
15. Callus induction and somatic embryogenesis of *Phalaenopsis* / Y. Ishii [et al.] // *Plant Cell Rep.* – 1998. – Vol. 17. – P. 446–450.
16. Micropropagation of *Phalaenopsis* 'R11 x R10' through somatic embryogenesis method / F. Antensari [et. al.] // *Asian J. of Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 2. – P. 145–150.
17. Islam, M. O. Effects of sucrose, maltose and sorbitol on callus growth of *Phalaenopsis*, *Doritaenopsis* and *Neofinetia* / M. O. Islam, S. Ichihashi // *J. Japan Soc. Hortic. Sci.* – 1999. – Vol. 68. – P.1124–1131.
18. Tokuhara, K. Induction of embryogenic callus and cell suspension culture from shoot tips excised from flower stalk buds of *Phalaenopsis* (Orchidaceae) / K. Tokuhara, M. Mii // *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* – 2001. – Vol. 37. – P. 457–461.
19. *Phalaenopsis* LEAFY COTYLEDON1-induced somatic embryonic structures are morphologically distinct from protocorm-like bodies / J. C. Chen [et. al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – P. 1594.

УДК 57.063.7:582.29(476)

**Андрей Геннадьевич Цуриков¹, Владимир Владимирович Голубков²,
Павел Николаевич Белый³, Ирина Михайловна Болсун⁴**

¹д-р биол. наук, доц., проф. каф. ботаники и физиологии растений
Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины

²канд. биол. наук, доц.

³канд. биол. наук, ученый секретарь

Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси

⁴студентка 3-го курса биологического факультета

Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины

Andrei Tsurykau¹, Vladimir Golubkov², Pavel Bely³, Iryna Bolsun⁴

¹Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Botany and Plant Physiology
of Francisk Skorina Gomel State University

²Candidate of Biological Sciences,

Associate Professor ³Candidate of Biological Sciences Biological Sciences, Scientific Secretary
of the Central Botanical Garden of National Academy of Sciences of Belarus

⁴3-rd Year Student of the Department of Biology

of Francisk Skorina Gomel State University

e-mail: ¹tsurykau@gmail.com; ²vgolubkov@tut.by; ³belyj@cbg.org.by; ⁴irisha.bolsun@gmail.com

РЕВИЗИЯ ЛИШАЙНИКОВ РОДА *BRYORIA* БЕЛАРУСИ. *I. B. CAPILLARIS* И *B. NADVORNIKIANA*

Проведена ревизия доступного гербарного материала лишайников рода *Bryoria*, собранного на территории Беларуси в период 1924–2017 гг. Методом тонкослойной хроматографии выявлено 46 образцов, содержащих алекториаловую и барбатоловую кислоты и относящихся к *Bryoria capillaris* (13 образцов) и *Bryoria nadvornikiana* (33 образца). Приводятся морфологические описания выявленных видов, их химический состав, особенности экологии и данные по распространению на территории Беларуси.

Ключевые слова: биоразнообразие, распространение, вторичные метаболиты, алекториаловая кислота, барбатоловая кислота, группа *implexa*.

Revision of Lichens of the Genus Bryoria in Belarus. I. B. capillaris and B. nadvornikiana

A revision of the available herbarium material of the lichen genus *Bryoria* collected on the territory of Belarus in the period of 1924–2017 was carried out. 46 specimens containing alectorialic and barbatolic acids were revealed using thin-layer chromatography. Of these, 13 specimens belonged to *Bryoria capillaris* and 33 specimens appeared to be *Bryoria nadvornikiana*. The article provides morphological descriptions of the mentioned species, their chemical composition, ecological features and distributional data on the territory of Belarus.

Key words: biodiversity, distribution, secondary metabolites, alectorialic acid, barbatolic acid, *implexa* group.

Введение

Несмотря на достаточно долгую историю лихенологических исследований в Беларуси [1], многие таксоны лишайников являются слабо изученными на ее территории. Данное утверждение относится не только к традиционно трудноопределимым таксонам накипных стерильных жизненных форм, но и к некоторым макролишайникам. К такому относится, в частности, род *Bryoria* Brodo & D. Hawksw., данные о разнообразии и встречаемости представителей которого на территории Беларуси являются фрагментарными. Результаты единственной ревизии лишайников этого рода (ранее рассматриваемых как *Alectoria* Ach.), проведенной в 1965 г. [2], позволили установить 8 номенклатурных комбинаций [*Alectoria crispa* Motyka, *A. haynaldii* Gyeln., *A. implexa* (Hoffm.) Röhl., *A. mirabilis* Motyka, *A. motycii* Bystrek nom. inval., *A. nidulifera* Norrl., *A. setacea* (Ach.) Motyka, *A. setacea* (Ach.) Motyka var. *tominii* Bystrek], из которых в настоящее

время 7 являются устаревшими [3–5]. Кроме того, в связи с изменившимися концепциями многих таксонов этого рода [6; 7] нельзя считать заслуживающими доверия многие определения видов рода *Bryoria* в белорусских литературных источниках. В связи с этим ревизия доступного гербарного материала лишайников рода *Bryoria*, собранного ранее на территории Беларуси, с применением современных методов идентификации представляется актуальной.

Материалы и методы

Материалом для данного исследования послужили образцы лишайников рода *Bryoria*, хранящиеся в гербариях Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси (MSK-L), Центрального ботанического сада НАН Беларуси (MSKH), Белорусского государственного университета (MSKU), Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины (GSU) и Ботанического института имени В. Л. Комарова РАН (LE). Всего было проанализировано 207 гербарных образцов сборов 1924–2017 гг. Дублетные сборы, хранящиеся в разных гербариях, принимали за один гербарный образец. Морфологию образцов изучали с помощью стереомикроскопа Nikon SMZ-745, состав вторичных метаболитов – методом тонкослойной хроматографии в системе растворителей С [8].

Результаты и их обсуждение

Результаты наших исследований показали, что в Беларуси произрастают два вида лишайников рода *Bryoria*, содержащих алекториаловую и барбатоловую кислоты, – *B. capillaris* (Ach.) Brodo & D. Hawksw. (13 образцов, или 6,3 % от количества исследованных) и *B. nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. (33 образца, или 15,9 % от количества исследованных). Ниже приводим морфологическое описание выявленных видов, а также их химический состав, экологию и данные по распространению на территории Беларуси.

Bryoria capillaris (Ach.) Brodo & D. Hawksw.

Таллом до 20 см длиной, свисающий, беловато-серый до серого, иногда желтоватый, редко светло-коричневый, ветвящийся, углы между ветвями преимущественно острые. Ветви в основном ровные, иногда скрученные; колючки и колючкообразные веточки отсутствуют. Псевдоцифеллы белые, плоские или слегка вдавленные, малозаметные. Соралии в основном слабо развитые, белые, редко – обильные. Апотеции и пикниды в белорусском материале не обнаружены.

Химически вид идентичен *Bryoria nadvornikiana*, поскольку оба содержат барбатоловую и алекториаловую кислоты в качестве основных веществ. Морфологически оба вида также близки, и некоторые образцы с трудом могут быть идентифицированы лишь по целому ряду признаков. В целом *B. capillaris* отличается от *B. nadvornikiana* более длинным, узким, вертикально ориентированным свисающим талломом с преобладанием острых углов ветвления у боковых ветвей, отсутствием латеральных колючек (на которые, однако, могут быть похожи молодые веточки в начале своего развития) и отсутствием фиолетового оттенка окраски таллома. От других видов со светлым талломом *B. capillaris* отличается химическим составом.

Следует отметить, что в 2019 г. С. G. Voluda с соавторами выявили значительное несоответствие между фенотипами и генотипами у представителей *Bryoria* секции *Implexae*, и предложили рассматривать все европейские виды (*B. capillaris*, *B. chalybeiformis*, *B. implexa*, *B. lanestris*, *B. kuemmerleana* и *B. subcana*) как синонимы *B. fuscescens* [7]. Однако в связи с их существенными химическими и морфологическими различиями многие исследователи до настоящего времени рассматривают эти таксоны как отдельные виды, несмотря на то что, по сути, они являются химическими расами или

формами *B. fuscescens* [4; 9]. В настоящем исследовании мы также придерживаемся концепции, изложенной в [6], и рассматриваем упомянутые таксоны в качестве самостоятельных видов. Данный выбор обусловлен тем, что в настоящее время существует ряд таксономических групп лишайников, в пределах которых мультилокусный филогенетический анализ не обеспечивает четкого разделения близких видов [10]. Для реконструкции филогении некоторых из этих групп успешным оказалось применение метода RADseq [11]. Возможно, секвенирование полных геномов в будущем позволит корректно провести разграничение таксонов *Bryoria* секции *Implexae*.

Химический состав. Атранорин, барбатоловая и алекториаловая кислоты. Соралии содержат фумарпротоцеттаровую кислоту.

Экология. На территории Беларуси *Bryoria capillaris* произрастает исключительно в хвойных лесах: в ельниках было собрано 7 (53,8 %) исследованных образцов, в сосняках – 2 (15,4 %). Только один образец (7,7 %) был собран в осиннике. Для оставшихся 3 образцов (23,1 %) информация об условиях произрастания отсутствовала.

В качестве субстрата вид предпочитает ель европейскую (*Picea abies* (L.) Karst.) – 76,9 %, березу повислую (*Betula pendula* Roth) – 15,4 % и осину (*Populus tremula* L.) – 7,7 %.

Распространение. *Bryoria capillaris* характеризуется голарктическим распространением, произрастая в Европе, Макаронезии, Азии и Северной Америке [4].

В Беларуси вид распространен неравномерно (рисунок 1), преимущественно встречаясь в северо-западных регионах страны.

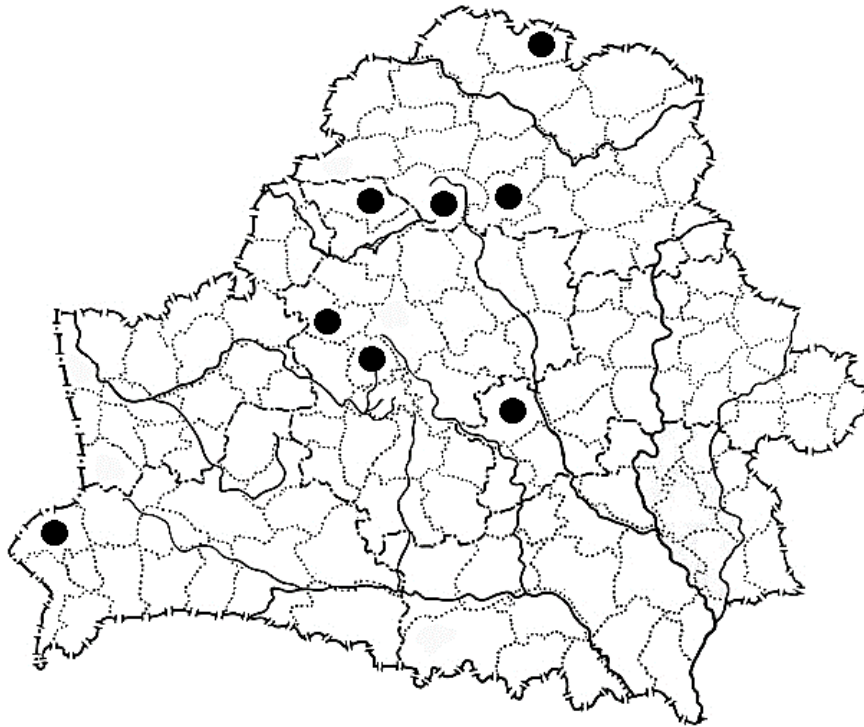


Рисунок 1 – Распространение *Bryoria capillaris* на территории Беларуси

Ранее считалось, что *Bryoria capillaris* является одним из наиболее часто встречающихся видов рода *Bryoria* на территории Беларуси [5]. Наши исследования показали, что это не так, и к данному виду относится лишь 6,3 % от общего количества исследованных образцов. Следует также отметить, что около половины проанализированных образцов (6 из 13) известны лишь по историческим данным (до 1980 г., согласно [12]). Та-

ким образом, по данным сборов, после 1980 г. (2006–2011 гг.) известно лишь семь локалитетов *Bryoria capillaris*. Все эти местообитания находятся в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) – Березинского биосферного заповедника (три образца), республиканского ландшафтного заказника «Красный бор» (два образца), национальных парков «Беловежская пуца» и «Нарочанский» (по одному образцу).

По данным [4], *Bryoria capillaris* приурочен к высокогорным и низкогорным местообитаниям, что может являться причиной низкой встречаемости данного вида в условиях равнинной Беларуси. Предыдущие сведения о распространении *B. capillaris* в Беларуси некорректны, что связано, по-видимому, как с исключительно морфолого-анатомическим подходом при определении образцов, так и с устаревшей концепцией данного таксона в старых определителях [13]. Согласно полученным результатам, настоящий вид можно рассматривать в качестве возможного кандидата для включения в очередное издание Красной книги Республики Беларусь.

Исследованные образцы. Брестская обл., Каменецкий р-н, Национальный парк «Беловежская пуца», Королево-Мостовское лесничество, кв. 780, выд. 9, в ельнике кисличном, на ели, П. Н. Белый, 16.10.2009 (MSKH-2108); Витебская обл., Докшицкий р-н, Березинский биосферный заповедник, Березинское лесничество, кв. 44 (у квартального столба 57/45/44), в ельнике черничном, на ели, П. Н. Белый, 20.02.2008 (MSKH-6560); Лепельский район, Березинский биосферный заповедник, граница Терешкинского и Паликского лесничеств, просека между 610 кв. (выд. 10, 24) и 626 кв. (выд. 5, 7), в ельнике долгомошном, на ели, П. Н. Белый, 11.01.2008 (MSKH-6588); Домжерицкое лесничество, кв. 350, в сосняке долгомошном, на березе, П. Н. Белый, 02.09.2006 (MSKH-6587); урочище «Великая река», на березе бородавчатой, Д. К. Гесь, 10.05.1960 (MSK-L); урочище Нивки, Сергучский канал, на ели, Д. К. Гесь 09.05.1960 (MSK-L); Россонский район, ландшафтный заказник «Красный бор», 55°57'10.64'' 28°29'34.34'', в ельнике, у края верхового болота на ели, А. В. Кручонок, 21.07.2016 (MSKH-6617); Юховичское лесничество, кв. 23, 1,3 км СВ д. Красный Бор, в сосняке мшистом, на ели, Д. В. Дубовик, А. Н. Скуратович, 11.09.2011 (MSK-L); Минская обл., Воложинский р-н, в ельнике чернично-лишайниковом, на ели, В. В. Голубков, 09.09.1973 (MSK-L); в ельнике мшистом, на ели, В. В. Голубков, 09.09.1973 (MSK-L); Дзержинский р-н, Негорельский лесхоз, в осиннике приручевом, на осине, Н. В. Горбач, 22.06.1952 (MSK-L); Мядельский р-н, национальный парк «Нарочанский», Мядельское лесничество, кв. 122, 3,2 км СВ д. Черемшицы, 55°54'47.44''N 26°52'25'', в ельнике черничном, на ели, П. Н. Белый, 17.08.2011 (MSKH-6622); Могилевская обл., Осиповичский р-н, п/о Жорновка, на ели, В. П. Савич, 1924 (LE).

***Bryoria nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw.**

Таллом до 15 см длиной, часто торчащий, дернинковидный, иногда свисающий, но с оттопыренным от субстрата основанием, от светло-серого до коричневого или буроватого цвета, иногда с небольшими черноватыми фрагментами, как правило, с фиолетовым оттенком на отдельных участках; ветвящийся, преимущественно с тупыми углами в местах ветвления (однако в верхушечной части обычно присутствуют ветвления с острыми углами). Колючки и колючкообразные веточки присутствуют, расположены перпендикулярно поверхности ветвей. Псевдоцифеллы развиты слабо. Соралии бугорчатые, иногда щелевидные, беловатые. Апотеции и пикниды в белорусском материале не обнаружены.

От химически идентичного вида *Bryoria capillaris* отличается более объемным, торчащим (по крайней мере, в основании), кустикоподобным, выглядящим объемным слоевищем (у *B. Capillaris* слоевище, как правило, нитевидно свисающее), многочисленными короткими колючкообразными боковыми веточками, присутствием на талломе

участков с выраженным фиолетовым оттенком, а также тупыми углами ветвлений основных ветвей в основании таллома.

В русскоязычных определителях указывается, что *B. nadvornikiana* характеризуется коротким двухцветным талломом, достигающим 7 см (max. 9 см) длиной, что отличает этот вид от *B. capillaris*, таллом которого существенно длиннее (до 30 см) [4; 13]. Эти данные несколько отличаются от видовых концепций, изложенных зарубежными авторами. По данным [3; 14], длина таллома *B. nadvornikiana* может достигать 15–20 см, а цвет обоих видов варьирует в широких пределах, что подтверждается нашими данными и свидетельствует о низкой возможности использования данных признаков для разграничения изучаемых видов. По-видимому, эти данные, а также отсутствие *B. nadvornikiana* в белорусских определителях [15; 16] приводили к неверному определению многих образцов этой группы видов на территории Беларуси.

Химический состав. Атранорин, барбатоловая и алекториаловая кислоты. Соралии содержат фумарпротоцеттаровую кислоту.

Экология. На территории Беларуси *Bryoria nadvornikiana* произрастает в основном в хвойных лесах: в сосновых лесах было собрано 10 образцов (30,3 %), в ельниках – 8 (24,2 %). В лиственных и смешанных лесах было найдено только 5 (15,2 %) образцов этого вида – 3 образца (9,1 %) в дубраве, по 1 образцу (9,1 % от всех образцов) – в смешанном лесу, в осиннике и лагге болотного массива. Для оставшихся 9 образцов (27,3 %) информация об условиях произрастания отсутствовала.

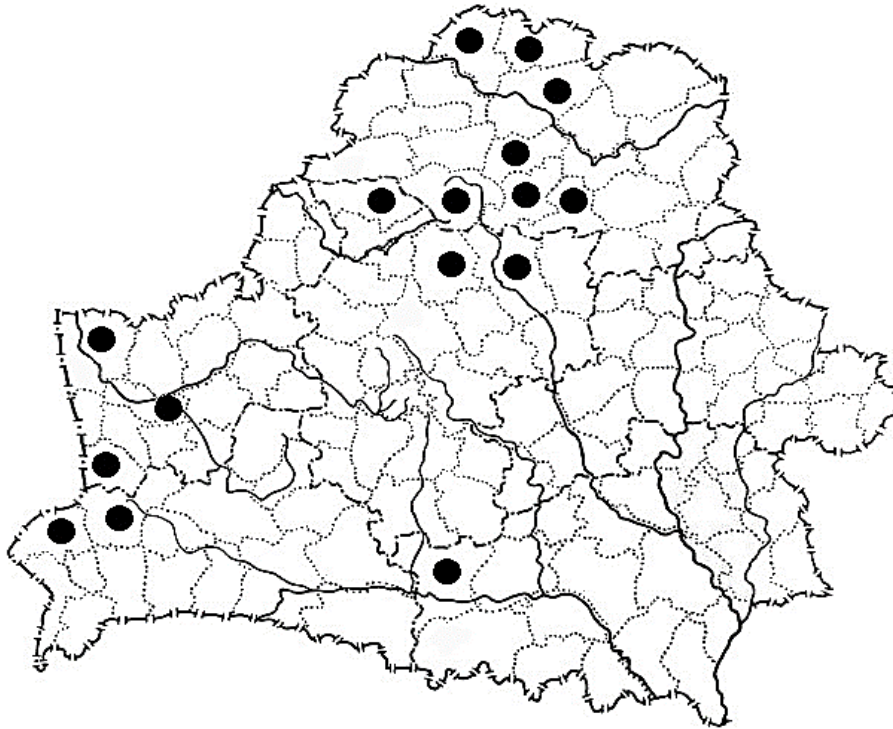
В качестве субстрата вид предпочитает кору деревьев (97,0 % образцов). Один образец был найден на камне (3,0 %). Эпифитные образцы произрастали на ели европейской (*Picea abies*) – 10 образцов (30,3 %), сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – 8 (24,2 %), березе повислой (*Betula pendula*) – 8 (24,2 %), дубе черешчатом (*Quercus robur* L.) – 5 (15,2 %) и иве белой (*Salix alba* L.) – 1 (3,0 %).

Распространение. *Bryoria nadvornikiana* произрастает в Европе, Азии, Африке, Северной Америке и на Гавайских островах [4].

В Беларуси вид распространен неравномерно (рисунок 2), встречаясь преимущественно в северо-западных регионах страны.

Ранее вид редко приводился для территории республики [17–21]. Результаты настоящего исследования показали, что *B. nadvornikiana* является обычным видом лишайников. Вид впервые указывается нами для территории Брестской области.

Исследованные образцы. Брестская обл., Каменецкий р-н, Национальный парк «Беловежская пуца», Королево-Мостовское лесничество, кв. 779, на дубе черешчатом, В. В. Голубков, 17.07.1983 (MSK-L); то же лесничество, кв. 740, выд. 38, в ельнике кисличном на ели, П. Н. Белый, 17.10.2009 (MSKH-2000); Пружанский р-н, Национальный парк «Беловежская пуца», Переровское лесничество, кв. 589, 500 км от хутора Переров, в дубраве грабово-кисличной на дубе, В. В. Голубков, 13.06.1983 (MSK-L); там же, В. В. Голубков, 15.07.1983 (MSK-L); то же лесничество, кв. 590, в дубраве чернично-кисличной на дубе (сухих сучьях), В. В. Голубков, 26.07.1988 (MSK-L); окр. г. Ружаны, Михаличское лесничество, на сосне, А. И. Осмоловская, 07.1965 (MSK-L); шоссе Пружаны, в сосняке вересковом, на сосне, Е. Е. Блудов, 13.05.1977 (MSK-L);



Рисунк 2 – Распространение *Bryoria nadvornikiana* на территории Беларуси

Витебская обл., Верхнедвинский р-н, 3 км ЮВ д. Прошки, в сосняке мшистом, на сосне у шоссе, В. В. Голубков, 16.06.1986 (MSK-L); Докшицкий район, Березинский биосферный заповедник, Березинское лесничество, кв. столб между кв. 44, 45, 57; $54^{\circ}55'02,4''$, $28^{\circ}12'08,0''$, в ельнике мшистом, на ели, П. Н. Белый, 10.03.2008 (MSKH-6590); тот же локалитет, в ельнике кисличном, на ели, П. Н. Белый, 20.02.2008 (MSKH-6584); 1,5 км СЗ д. Замосточье, в ельнике мшистом на ели, П. Н. Белый, 15.10.2010 (MSKH-3869); Лепельский район, Березинский биосферный заповедник, ЭЛОХ «Барсуки», кв. 79, выд. 18, в ельнике мшистом, на ели, П. Н. Белый, 13.07.2009 (MSKH-6602); Березинский биосферный заповедник, Домжеричское лесничество, кв. 284, выд. 7, болотный массив «Савский Мох», на березе, П. Н. Белый, 19.09.2006 (MSKH-6598); то же лесничество, кв. 350, в сосняке долгомошном, на березе бородавчатой, П. Н. Белый, 02.09.2006 (MSKH-6586); Березинский биосферный заповедник, Паликское лесничество, кв. 650, выд. 11, в осиннике дубово-кисличном, на ели, П. Н. Белый, 23.06.2008 (MSKH-6610); Березинский биосферный заповедник, граница Терешкинского и Паликского лесничеств, просека между 610 кв. (выд. 10, 24) и 626 кв. (выд. 5, 7), в ельнике долгомошном, на ели, П. Н. Белый, 11.01.2008 (MSKH-6589); Березинский биосферный заповедник, окр. д. Крайцы, на сосне, Н. В. Горбач, 03.11.1968 (MSK-L); Березинский биосферный заповедник, по дороге из Крайцы в Броды, в смешанном лесу, на березе, Н. В. Горбач, 20.10.1961 (MSK-L); тот же локалитет, урочище «Великая река», на березе, Н. В. Горбач, 10.05.1960 (MSK-L); Полоцкий р-н, окр. д. Глубокое, в сосняке мшистом, на иве, В. В. Голубков, 21.07.1985 (MSK-L); Россонский р-н, окр. д. Юховичи, в сосняке чернично-лишайниковом на березе, В. В. Голубков, (MSK-L); в сосняке чернично-мшистом, на сосне, В. В. Голубков, 14.10.1984 (MSK-L); Ушачский р-н, окр. д. Заозерье, у СЗ берега оз. Полуозерье, на камне, В. В. Голубков, 12.08.1980 (MSK-L); Чашникский р-н, 1 км СВ д. Заточек, на опушке сосняка на березе, В. В. Голубков, 09.06.1987 (MSK-L); Гомельская обл., Житковичский р-н, окр. д. Червоное, на березе, Д. К. Иванова, 04.07.1956 (MSK-L); ГРОДНЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ, Гродненский район, окр. д. Рыбница, на сосне, А. Бумбуль

(MSK-L); *Мостовский р-н*, Куриловичское лесничество, на ели, А. В. Ключко, 25.08.1968 (MSKU); *Свислочский р-н*, Нацио-нальный парк «Беловежская пуца», Язвинское лесничество, кв. 113, в ельнике кисличном, на дубе, В. В. Голубков, 26.09.1984 (MSK-L); *Мисская обл., Борисовский р-н*, Велядитская лесная учебно-опытная станция, в сосновом бору, на ели, В. Н. Шалюта, М. П. Томин, 22.07.1935 (MSK-L); *Логойский р-н*, г. п. Плещеницы, на березе, 07.1976 (MSK-L); *Мядельский р-н*, окр. д. Узла, в сосняке мшистом, на сосне, Г. П. Антонов, 18.05.1985 (MSK-L); Национальный парк «Нарочанский», Мядельское лесничество, 3,2 км СВ д. Черемшицы, кв. 122, выд. 15, 54°47'4 N, 26°52'25' E, в ельнике черничном, на ели, П. Н. Белый, 17.08.2011 (MSKH-6620); окр. оз. Нарочь, окр. д. Степенево, в сосняке вересковом, на сосне, В. В. Голубков, 12.07.1978 (MSK-L).

Заклучение

В результате ревизии 207 образцов лишайников рода *Bryoria* с использованием метода тонкослойной хроматографии было выявлено 46 образцов, содержащих алекториаловую и барбатоловую кислоты и относящихся к *Bryoria capillaris* (13 образцов) и *Bryoria nadvornikiana* (33 образца). Поскольку около половины проанализированных образцов *B. capillaris* известны лишь по историческим данным, а все современные локалитеты находятся в пределах ООПТ, настоящий вид можно рассматривать в качестве потенциального кандидата для включения в очередное издание Красной книги Республики Беларусь. Наоборот, ранее редко приводившийся для Беларуси *B. nadvornikiana* является обычным видом на ее территории и впервые указывается нами для Брестской области. Полученные в ходе исследования данные уточняют экологию и географию вышеуказанных видов в пределах как Республики Беларусь, так и Европы в целом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цуриков, А. Г. Лишайники Беларуси: история и основные итоги изучения / А. Г. Цуриков // Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2019. – № 3 (114). – С. 92–101.
2. Горбач, Н. В. Лішайнікі роду *Alectoria* Ach. у Беларусі / Н. В. Горбач // Вес. Акад. навук Беларус. ССР. Сер. біял. навук. – 1965. – № 1. – С. 55–58.
3. Myllys, L. *Bryoria* / L. Myllys, S. Valmala, H. Holien // Nordic Lichen Flora. Vol. 4. Parmeliaceae / A. Thell, R. Moberg (eds.). – Göteborg : Zetterqvist tryckeri AB, 2011. – P. 26–37.
4. Флора лишайников России. Семейство Parmeliaceae / отв. ред. М. П. Андреев [и др.]. – М. ; СПб. : КМК, 2022. – 187 с.
5. Tsurukau, A. A provisional checklist of the lichens of Belarus / A. Tsurukau // Opuscula Philolichenum. – 2018. – Vol. 17. – P. 374–479.
6. Taxonomy of *Bryoria* section *Implexae* (Parmeliaceae, Lecanoromycetes) in North America and Europe, based on chemical, morphological and molecular data / S. Velmala [et al.] // Annales Botanici Fennici. – 2014. – Vol. 51, nr 6. – P. 345–371. – DOI: 10.5735/085.051.0601
7. Evaluating methodologies for species delimitation: the mismatch between phenotypes and genotypes in lichenized fungi (*Bryoria* sect. *Implexae*, Parmeliaceae) / C.G. Boluda [et al.] // Persoonia. – 2019. – Vol. 42. – P. 75–100. – DOI: 10.3767/persoonia.2019.42.04
8. Orange, A. Microchemical methods for the identification of lichens / A. Orange, P. W. James, F. J. White. – London : British Lichen Society, 2001. – 101 p.
9. Nimis, P. L. ITALIC – The Information System on Italian Lichens. Version 7.0. [Electronic resource] / P. L. Nimis, S. Martellos // University of Trieste, 2022. – Mode of access: <https://dryades.units.it/italic>. – Date of access: 22.11.2022.
10. Low genetic differentiation between apotheciata *Usnea florida* and sorediate *Usnea subfloridana* (Parmeliaceae, Ascomycota) based on microsatellite data / P. Degtjarenko [et al.] // Fungal Biology. – 2020. – Vol. 124. – P. 892–902. – DOI: 10.1016/j.funbio.2020.07.007

11. Population genomic analyses of RAD sequences resolves the phylogenetic relationship of the lichen-forming fungal species *Usnea antarctica* and *Usnea aurantiacoatra* / F. Grewe [et al.] // *MycKeys*. – 2018. – Vol. 113. – 91e113. – DOI: 10.3897/mycokeys.43.29093
12. The lichens and allied fungi of Mount Mitchell State Park, North Carolina: a first checklist with comprehensive keys and comparison to historical data / J. C. Lendemer [et al.] // *Castanea*. – 2017. – Vol. 82, nr 2. – P. 69–97. – DOI: 10.2179/17-126
13. Определитель лишайников России: Алекториевые, Пармелиевые, Стереокаулоновые. – СПб. : Наука, 1996. – Вып. 6. – 203 с.
14. The lichens of Great Britain and Ireland / C. W. Smith [et al.]. – London : The British Lichen Society, 2009. – 1046 p.
15. Горбач, Н. В. Определитель листоватых и кустистых лишайников БССР / Н. В. Горбач. – Минск : Наука и техника, 1965. – 181 с.
16. Горбач, Н. В. Лишайники Белоруссии. Определитель / Н. В. Горбач. – Минск : Наука и техника, 1973. – 340 с.
17. Голубков, В. В. Видовой состав и структура лишенофлоры государственного заповедно-охотничьего хозяйства «Беловежская пуша». Ч. 1. Видовой состав и структура лишенофлоры Беловежской пуши : аннот. список / В. В. Голубков // АН БССР. – Минск, 1987. – 85 с. – Деп. в ВИНТИ 17.03.1987. – № 2829.
18. Голубков, В. В. Лишайники охраняемых природных территорий Беларуси (флористическая и эколого-географическая характеристика) : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.05; 03.00.24 / В. В. Голубков. – Минск, 1992. – 503 л.
19. Яцына, А. П. Очерк о лишайниках стационара «Щитовка» Витебского государственного университета / А. П. Яцына // Биологическое разнообразие Белорусского Поозерья: современное состояние, проблемы использования и охраны : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Витебск, 19–21 нояб. 2008 г. / УО «ВГУ им. П. М. Машерова», Витеб. обл. ком. природ. ресурсов и охраны окружающей среды ; редкол.: А. М. Дорофеев (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2008. – С. 287–289.
20. Яцына, А. П. Аннотированный список лишайников сосновых лесов Беларуси / А. П. Яцына // Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования. – 2013. – Вып. 8. – С. 152–186.
21. Yurchenko, Yu. O. Lichens of Belarus: an illustrated electronic handbook / E. O. Yurchenko. – Minsk : K. Ye. Dovgailo, 2011. – 1 CD.

REFERENCES

1. Curikov, A. G. Lishajniki Bielarusi: istorija i osnovnyje itogi izuchienija / A. G. Curikov // *Izv. Gomielsk. gos. un-ta im. F. Skoriny*. – 2019. – № 3 (114). – S. 92–101.
2. Gorbach, N. V. Lishajniki rodu *Alectoria* Ach. u Bielarusi / N. V. Gorbach // *Vies. Akad. navuk Bielarusi. Sier. bijal. navuk*. – 1965. – № 1. – S. 55–58.
3. Myllys, L. *Bryoria* / L. Myllys, S. Valmala, H. Holien // *Nordic Lichen Flora*. Vol. 4. *Parmeliaceae* / A. Thell, R. Moberg (eds.). – Göteborg : Zetterqvist tryckeri AB, 2011. – P. 26–37.
4. Flora lishajnikov Rossii. Siemiejstvo *Parmeliaceae* / otv. ried. M. P. Andriejev [i dr.]. – M. ; SPb. : KMK, 2022. – 187 s.
5. Tsurukau, A. A provisional checklist of the lichens of Belarus / A. Tsurukau // *Opuscula Philolichenum*. – 2018. – Vol. 17. – P. 374–479.
6. Taxonomy of *Bryoria* section *Implexae* (Parmeliaceae, Lecanoromycetes) in North America and Europe, based on chemical, morphological and molecular data / S. Velmala [et al.] // *Annales Botanici Fennici*. – 2014. – Vol. 51, nr 6. – P. 345–371. – DOI: 10.5735/085.051.0601

7. Evaluating methodologies for species delimitation: the mismatch between phenotypes and genotypes in lichenized fungi (*Bryoria* sect. *Implexae*, Parmeliaceae) / C.G. Boluda [et al.] // *Persoonia*. – 2019. – Vol. 42. – P. 75–100. – DOI: 10.3767/persoonia.2019.42.04
8. Orange, A. Microchemical methods for the identification of lichens / A. Orange, P. W. James, F. J. White. – London : British Lichen Society, 2001. – 101 p.
9. Nimis, P. L. ITALIC – The Information System on Italian Lichens. Version 7.0. [Electronic resource] / P. L. Nimis, S. Martellos // University of Trieste, 2022. – Mode of access: <https://dryades.units.it/italic>. – Date of access: 22.11.2022.
10. Low genetic differentiation between apotheciata *Usnea florida* and sorediate *Usnea subfloridana* (Parmeliaceae, Ascomycota) based on microsatellite data / P. Degtjarenko [et al.] // *Fungal Biology*. – 2020. – Vol. 124. – P. 892–902. – DOI: 10.1016/j.funbio.2020.07.007
11. Population genomic analyses of RAD sequences resolves the phylogenetic relationship of the lichen-forming fungal species *Usnea antarctica* and *Usnea aurantiacoatra* / F. Grewe [et al.] // *MycoKeys*. – 2018. – Vol. 113. – 91e113. – DOI: 10.3897/mycokeys.43.29093
12. The lichens and allied fungi of Mount Mitchell State Park, North Carolina: a first checklist with comprehensive keys and comparison to historical data / J. C. Lendemer [et al.] // *Castanea*. – 2017. – Vol. 82, nr 2. – P. 69–97. – DOI: 10.2179/17-126
13. Opriedielitel' lishajnikov Rossii: Alliektoriyevyje, Parmielijevyje, Stierieokauluonyvyje. – SPb. : Nauka, 1996. – Vyp. 6. – 203 S.
14. The lichens of Great Britain and Ireland / C. W. Smith [et al.]. – London : The British Lichen Society, 2009. – 1046 p.
15. Gorbach, N. V. Opriedielitel' listovatykh i kustistykh lishajnikov BSSR / N. V. Gorbach. – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1965. – 181 s.
16. Gorbach, N. V. Lishajniki Bielorusii. Opriedielitel' / N. V. Gorbach. – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1973. – 340 s.
17. Golubkov, V. V. Vidovoj sostav i struktura likhienoflory gosudarstviennogo zapovedno-okhotnich'jego khoziajstva «Bieloviezhskaja pushcha». Ch. 1. Vidovoj sostav i struktura likhienoflory Bieloviezhskoj pushchi : annot. spisok / V. V. Golubkov // AN BSSR. – Minsk, 1987. – 85 s. – Diep. v VINITI 17.03.1987. – № 2829.
18. Golubkov, V. V. Lishajniki okhraniajemykh prirodnykh tierritorij Bielarusi (floristichieskaja i ekologo-geografichieskaja kharakteristika) : dis. ... kand. biol. nauk : 03.00.05 ; 03.00.24 / V. V. Golubkov. – Minsk, 1992. – 503 l.
19. Yacyna, A. P. Ochierk o lishajnikakh stacionara «Shchitovka» Vitiebskogo gosudarstviennogo univiersitieta / A. P. Yacyna // Biologichieskoje raznoobrazije Bieloruskogo Poozier'ja: sovriemiennoje sostojanije, probliemy ispol'zovanija i okhrany : materialy II Miezhdunar. nauch.-prakt. konf., Vitiebsk, 19–21 nojab. 2008 g. / UO «VGU im. P. M. Masherova», Vitieb. obl. kom. prirod. riesursov i okhrany okruzhajushchiej sriedy ; riedkol.: A. M. Dorofiejev (gl. ried.) [i dr.]. – Vitiebsk, 2008. – S. 287–289.
20. Yacyna, A. P. Annotirovannyj spisok lishajnikov sosnovykh liesov Bielarusi / A. P. Yacyna // Osobo okhraniajemyje prirodnyje tierritorii Bielarusi. Isslied. – 2013. – Vyp. 8. – S. 152–186.
21. Yurchenko, Ye. O. Lichens of Belarus: an illustrated electronic handbook / Ye. O. Yurchenko. – Minsk : K. E. Dovgajlo, 2011. – 1 CD.

УДК: 579:616.9

Ирина Сергеевна Чернейаспирант 3-го года обучения каф. биотехнологии
Полесского государственного университета**Iryna Chernei**3-d Year Postgraduate Student of Study of the Department of Biotechnology
of Polesky State University
e-mail: semitcko.i@yandex.ru**АНТИБИОПЛЕНОЧНАЯ АКТИВНОСТЬ ПРИРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В ОТНОШЕНИИ CANDIDA SPP***

Candida spp. является наиболее распространенным видом грибов в микробиоте человека, а также основным возбудителем внутрибольничных инфекций, в частности пневмоний и инфекций мочевыводящих путей. Способность образовывать биопленку некоторых видов грибов этого рода, обеспечивает снижение восприимчивости их к ряду противогрибковых препаратов и устойчивости к защитным механизмам хозяина, что, в свою очередь осложняет лечение инфекции. В данном обзоре проанализированы особенности структурной организации и определены механизмы резистентности биопленки, а также охарактеризованы природные компоненты, полученные из эфирных масел, которые способны ингибировать и разрушать биопленку клеток рода *Candida*. Выявлено, что компоненты эфирных масел характеризуются наличием клеточных механизмов действия на клетки биопленки *Candida* и способны повысить эффективность противогрибковых препаратов. Эфирные масла можно рассматривать в качестве потенциального средства лечения инфекций, связанных с биопленкой, т. к. они содержат большое количество биологически активных веществ, которые могут войти в основу создания перспективных противогрибковых препаратов.

Ключевые слова: *Candida spp.*, биопленка, природные соединения, эфирные масла, противогрибковая активность.

Antibiofilm Activity of Natural Compounds Against Candida spp

Candida spp. is the most common species of fungi in the human microbiota and the main causative agent of nosocomial infections, particularly pneumonia and urinary tract infections. The ability to form a biofilm of some fungal species of this genus provides reduced susceptibility to a number of antifungal drugs and resistance to the host's defense mechanisms, which in turn complicates the treatment of the infection. In this review, the structural organization features and mechanisms of biofilm resistance are analyzed, and natural components derived from essential oils, which are able to inhibit and destroy the biofilm of *Candida* cells, are characterized. It has been revealed that the components of essential oils are characterized by the presence of cellular mechanisms of action on *Candida* biofilm cells and can increase the effectiveness of antifungal drugs. Essential oils can be considered a potential treatment for infections associated with biofilm, as they contain a large number of biologically active substances that can form the basis for the creation of promising antifungal drugs.

Key words: *Candida spp.*, biofilm, natural compounds, essential oils, antifungal activity.

Введение

В последние десятилетия грибковые инфекции человека становятся актуальной проблемой в системе здравоохранения и многими авторами рассматриваются как запущенные инфекционные заболевания [1]. Микоз представляет собой любое инфекционное заболевание, которое вызывается паразитическими грибами. Разнообразие патогенных грибов очень велико. Это вызывает сложности в диагностике и назначении оперативной противогрибковой терапии, что в, свою очередь, может приводить к летальному

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь по гранту «Исследование взаимодействия компонентов эфирного масла *Humulus spp.* с белками биопленки *Candida albicans*» (договор № 93 от 21.03.2023 г.).

Научный руководитель – Виталий Тадеушевич Чещевик, кандидат биологических наук, доцент, декан биотехнологического факультета Полесского государственного университета.

исходу, особенно у лиц с ослабленным иммунитетом. Следует также отметить возникновение во многих клиниках внутрибольничных инфекций, которые связаны с быстрой изменчивостью микроорганизмов, приводящей к постоянному появлению новых устойчивых к противогрибковым препаратам форм [2]. Дрожжеподобные грибы рода *Candida* – наиболее распространенные возбудители микозов, а также основная группа микроорганизмов способная вызывать образование биопленок в организме человека [3].

Для лечения большинства грибковых инфекций применяют четыре основных класса противогрибковых препаратов: азолы, полиены, эхинокандины и аналоги нуклеозидов. Азолы (например, флуконазол) – наиболее широко применяемый класс противогрибковых средств, который подавляет биосинтез эргостерола, воздействуя на деметилазу Erg11, что приводит к накоплению токсичных промежуточных продуктов метаболического пути стерола в клетке. Полиены (например, амфотерицин В) действуют путем повышения уровня эргостерола в клеточной мембране, тем самым образуя поры, которые нарушают протонный градиент клетки путем повышения проницаемости и дестабилизации клеточной мембраны. Эхинокандины (например, каспофунгин) обладают фунгицидным действием против большинства грибов путем подавления синтеза β -1,3-глюканов, которые являются критически важными полисахаридными компонентами клеточных стенок грибов [4].

Возникновение устойчивости грибов рода *Candida* к существующим антифунгальным препаратам, а также появление такой формы, как биопленка, которая обеспечивает снижение восприимчивости грибов к некоторым противогрибковым препаратам и защитным механизмам хозяина, приводят к осложнениям в лечении инфекции и ставят перед необходимостью поиска новых эффективных лекарственных веществ, обладающих высокой специфичностью действия [5]. Создание новых противогрибковых препаратов идет в двух направлениях: усовершенствование уже имеющихся антимикотиков и поиск новых лекарственных средств, в частности природного происхождения.

Цель работы – проанализировать данные о взаимодействии различных природных соединений с биопленками *Candida spp.* для дальнейшего поиска потенциальных противогрибковых препаратов. В обзоре делается акцент на синергической антимикробной активности природных соединений с противогрибковыми препаратами, что может способствовать их внедрению в клиническую практику.

Основная часть

Особенности биопленки Candida spp.

Candida spp. является наиболее распространенным видом грибов в микробиоте человека, а также основным возбудителем внутрибольничных инфекций, в частности пневмоний и инфекций мочевыводящих путей. Этот род бессимптомно колонизирует многие участки тела, особенно желудочно-кишечный и мочеполовой тракты здоровых людей. Изменения в иммунитете, стресс, резидентная микробиота и другие факторы могут привести к избыточному росту *Candida spp.*, вызывая широкий спектр инфекций, от поверхностных слизистых до гематогенно-диссеминированного кандидозов [5]. Способность образовывать биопленку некоторых видов грибов рода *Candida* обеспечивает снижение восприимчивости их к ряду противогрибковых препаратов и устойчивости к защитным механизмам хозяина, что, в свою очередь, осложняет лечение инфекции [6].

За последнее время исследования в области биопленок микроорганизмов приобрели особую актуальность. Ранее микроорганизмы зачастую изучались в свободно плавающих (планктонных) культурах или в виде колоний, выращенных на поверхности чашек с питательным агаром, в то же время принято считать, что биопленка является пред-

почтительным и, вероятно, «естественным» состоянием роста для большинства микроорганизмов. Стоит отметить, что универсальной особенностью биопленок является их повышенная устойчивость к химическим и физическим повреждениям, что затрудняет борьбу с ними в клинических условиях вследствие снижения эффективности лекарственных средств [5].

Биопленка представляет собой сообщество клеток, которые прикрепляются к поверхности (или находятся на границе раздела воздух – жидкость), окружены внеклеточным матриксом, который отличает их от свободно плавающих клеток [6].

Candida albicans считается наиболее распространенным и хорошо изученным грибковым патогеном, но в то же время показан рост заболеваемости и смертности от овых видов *Candida* [1]. В настоящее время *C. tropicalis* считается одним из наиболее встречающихся грибковых патогенов, и в недавних публикациях была выявлена его устойчивость к стандартным противогрибковым препаратам, например, азолам [7].

Как *C. albicans*, так и *C. tropicalis* обладают широким спектром факторов вирулентности и комменсальных характеристик, придающих им способность колонизировать и внедряться в ткани хозяина. Эти факторы включают экспрессию адгезинов и инвазинов на клеточной поверхности; способность повреждать клетки хозяина; тигмотропизм (восприятие контакта); фенотипическое переключение; секрецию гидролитических ферментов и образование биопленок [8].

Предполагается, что образование зрелых биопленок и последующая продукция внеклеточного матрикса зависит от вида, штамма и условий окружающей среды (таких как pH, состав среды и содержание кислорода). На адгезию клеток влияет несколько факторов: профиль белков клеточной стенки и физико-химические свойства клеточной поверхности [9].

Формирование биопленки *Candida* включает ряд этапов. Первоначально одна дрожжевая клетка прикрепляется к субстрату, образуя основу для слоя дрожжевых клеток (этап прилипания) [6]. За этой начальной фазой следует фаза клеточной пролиферации, когда клетки изменяются и продолжают расти в нитевидную структуру клеток гиф через поверхность (стадия инициации). Сборка гиф определяет начало формирования биопленки, в результате чего образуется сложная сеть из нескольких слоев полиморфных клеток, включающих клетки гиф (цепочки цилиндрических клеток), клетки псевдогифов (эллипсоидные клетки, соединенные конец в конец) и круглые дрожжевые клетки, заключенные во внеклеточный матрикс. Это придает биопленке толстый структурированный вид, обеспечивающий защиту от химических и физических повреждений (этап созревания). Наконец, неприлипающие дрожжевые клетки отделяются от биопленки в окружающую среду, чтобы найти подходящее место для прикрепления (этап рассредоточения) [10].

Экспериментальные данные подтверждают гетерогенность биопленок *Candida spp.*, которые состоят из плотных слоев дрожжевых бластопоп, гиф, псевдогиф и внеклеточного матрикса. В частности, гены ALS 1-3 и HWP1 кодируют белки, связанные с процессами адгезии, в т. ч. и к буккальному эпителию человека. Сверхэкспрессия WOR1 и EFG1 способствует переходу клеток в другую (непрозрачную) фазу, при которой начинается процесс формирования биопленки. Кроме того, генетический анализ подтвердил, что и дрожжи, и гифы играют уникальную роль в формировании биопленок [10].

Исследование морфологии и состава биопленки образованных *C. glabrata*, *C. parapsilosis* и *C. tropicalis*, обнаружили некоторые их отличительные особенности. По морфологическим признакам биопленка *C. parapsilosis* состоит как из дрожжей, так и из псевдогиф. Биопленка у *C. tropicalis* в большей степени состоит только из дрожжевых клеток, но могут встречаться длинные гифальные филаменты. Биопленка *C. glabrata* содержит только дрожжевые клетки. В свою очередь, матрикс биопленок различен по содержанию углеводов и белков у трех представленных видов [9].

Противогрибковая терапия и механизмы резистентности биопленки *Candida spp.*

По сравнению с антибиотиками разработка противогрибковых средств была относительно ограниченной. Это объясняется несколькими факторами, включающими в себя проблемы с выявлением противогрибкового агента, который действует на эукариотический грибковый тип клеток, не являясь при этом токсичным для клеток хозяина.

Выделяют ряд классических противогрибковых препаратов, которые обладают различным механизмом воздействия на грибы рода *Candida*. Так, полиеновые препараты (амфотерицин В), являются фунгицидами благодаря их способности взаимодействовать с эргостеролом внутри клеточной мембраны, что способствует образованию пор и приводит к потере цитоплазматического содержимого [4].

Развитие устойчивости к полиенам происходит у *Candida spp.* в результате изменения содержания или состава стеролов в клеточной мембране. Для *Candida spp.* показан дефектный биосинтез эргостерола в результате мутации в гене ERG3, а также мутаций в ERG11 (гене, который продуцирует ланостерол 14а-деметилазу) и в ERG6 (гене, который необходим для нормальной функции мембраны, но не является существенным для биосинтеза стерола) [10].

В свою очередь, препарат амфотерицин В обладает широчайшим спектром противогрибковой активности и используется в случаях серьезных и инвазивных кандидозных инфекций. Устойчивость к амфотерицину В остается редкой во время лечения, но выделяются виды с повышенной минимальной ингибирующей концентрацией к данному препарату. В частности, показано, что *C. tropicalis* является быстрорастущим типом грибов, способных образовывать агрессивные формы биопленки, устойчивые к липосомальному амфотерицину в [7].

Еще один класс противогрибковых средств – азолы – способны ингибировать биосинтез эргостерола путем вмешательства в грибковый фермент ланостеролдеметилазу. Ключевой функцией этого фермента является превращение ланостерола в эргостерол, а ингибирование этого процесса приводит к истощению стерола в клеточной мембране грибов [11].

Тестирование на чувствительность показало, что флуконазол активен в отношении нескольких видов *Candida*, включая *C. albicans* и *C. parapsilosis* [7]. Устойчивость к азолам, в частности к флуконазолу, может быть результатом количественных или качественных модификаций целевых ферментов, ограниченного доступа лекарственного средства к мишени или комбинации этих механизмов [10]. Другой механизм, с помощью которого виды *Candida* сопротивляются действию азольных противогрибковых препаратов, включает активное выведение лекарственного средства из клетки посредством активации двух видов транспортных белков, кодируемых генами MDR или CDR [11].

Эхинокандины являются последними разработанными противогрибковыми средствами, и на сегодняшний день их применение было очень ограниченным для оценки резистентности. Их принцип действия связан с воздействием на компоненты клеточной стенки, например, b-1,3-D-глюкан, который является ключевым компонентом клеточной стенки грибов и отсутствует в клетках млекопитающих. Вмешательство в фермент b-1,3-D-глюкансинтазу может ингибировать синтез b-1,3-D-глюкана. Микроорганизмы, которые обладают врожденной устойчивостью к эхинокандинам, либо вырабатывают недостаточное количество целевого фермента b-1,3-D-глюкансинтазы, либо продуцируют альтернативную форму фермента с пониженным связыванием эхинокандина. Все эхинокандины проявляют фунгицидную активность в отношении видов *Candida*. Эхинокандины высокоактивны в отношении *C. albicans*, *C. glabrata* и *C. tropicalis* как *in vitro*, так и *in vivo*. Важно подчеркнуть, что значения минимальной ингибирующей концентрации

для эхинокандинов, как правило, выше для *C. parapsilosis*, чем у большинства других распространенных видов *Candida*, особенно *C. albicans* [7].

С клинической точки зрения, наиболее важной особенностью биопленок *Candida* является их роль в повышении толерантности к традиционной противогрибковой терапии [5]. Кроме того, биопленка резко повышает устойчивость клеток к наиболее часто используемым противогрибковым средствам (флуконазол и амфотерицин В) [9]. Также было показано, что биопленки таких видов, как *C. tropicalis*, *C. parapsilosis* и *C. glabrata*, проявляют пониженную чувствительность к противогрибковым препаратам. Хотя механизмы лекарственной устойчивости биопленки до конца не изучены, в настоящее время существует консенсус в отношении того, что толерантность биопленки является сложным многофакторным явлением, включающим различные молекулярные механизмы, связанные с ограниченным проникновением лекарственного средства через матрикс и присутствием так называемых «персистирующих» клеток внутри биопленки, которые выживают при воздействии препарата [7].

Зрелая биопленка образует внеклеточный матрикс, формирование которого определяется штаммом *Candida* и зависит от условий окружающей среды. Недавно было высказано предположение, что возможный вклад β -1,3 глюканов, высвобождающихся во внеклеточный матрикс, играет определенную роль в снижении чувствительности к местным лекарственным средствам. Был описан путь, индуцируемый биопленкой *Candida*, который участвует в доставке глюкана в матрикс и влияет на лекарственную устойчивость. Выраженная устойчивость к флуконазолу и амфотерицину В у биопленки *C. albicans* была связана с изменениями архитектуры клеточной стенки за счет повышенного содержания β -1,3 глюкана по сравнению с планктонными клетками. Более того, повышенные уровни β -1,3 глюкана были обнаружены во внеклеточном матриксе биопленки [8].

Рост устойчивости биопленки к противогрибковым препаратам связан с повышением метаболической активности формирующейся биопленки, и предполагается, что устойчивость к активному веществу развивается с течением времени и согласуется с созреванием самой биопленки [5].

Устойчивость к азолам, представленным флуконазолом в биопленках *C. albicans*, в основном обусловлена экспрессией эффлюксных насосов (Cdr1p, Cdr2p и Mdr1p) или мутацией в гене-мишени ERG11, кодирующем ланостерол 14- α деметилазу – важнейший фермент в эргостероловом пути. Другие гены ERG, а именно ERG1, ERG3, ERG7, ERG9 или ERG25, могут дифференцированно регулироваться во время формирования биопленки. Было доказано, что флуконазол, добавленный к полностью сформированным биопленкам, практически не оказывает эффекта даже при очень высоких концентрациях. С другой стороны, развитие биопленки было частично уменьшено, когда его вводили в начале ее формирования [8].

Такие виды, как *C. glabrata*, *C. parapsilosis* или *C. tropicalis*, проявляли аналогичную устойчивость к азолам, что позволяет предположить, что и эта особенность универсальна и в целом связана с образованием биопленок [6].

Разработка новых подходов к диагностике и лечению инвазивных грибковых инфекций является предметом интенсивных исследований. Примером может служить исследование поверхностного белка CR3-RP, который активно участвует в адгезии и развитии биопленки, а использование антител против данного белка может быть перспективным в развитии иммунотерапии и разработке вакцин против инфекций, связанных с биопленкой *Candida* [7].

Из-за появления штаммов *Candida* с множественной лекарственной устойчивостью и необходимостью лечения таких устойчивых форм, как биопленки, применение натуральных продуктов в качестве новых и эффективных методов лечения заняло

бы особое место в клиническом лечении. Исследования показали, что растительные продукты, в т. ч. эфирные масла, экстракты и чистые соединения, оказывают значительное влияние на устойчивые и образующие биопленку виды *Candida*. Природные соединения, полученные из различных частей растения, таких как корни, листья и плоды, обладают сильными лечебными свойствами и проявляют антибиопленочную активность [12].

Недавние исследования группы ученых показали, что различные природные соединения, такие как куркумин, коричный альдегид, эвгенол и тимол, не только ингибируют образование биопленки, но и устраняют зрелые структуры биопленки. Кроме того, комбинированное лечение противогрибковыми препаратами и различными природными соединениями может быть эффективным решением для лечения распространенных заболеваний благодаря их повышенной активности и меньшей токсичности, а также снижению дозировок лекарств и уменьшению вероятности развития резистентных штаммов [13].

Кроме того, природные соединения способны взаимодействовать с различными клеточными процессами дрожжей *Candida*, такими как опосредованный ABC-транспорт лекарств, развитие клеточного цикла, митохондриальная активность и биосинтез эргостерола, хитина и глюкана. Конечная цель заключается в разработке природных соединений в качестве антибиопленочных агентов, которые можно использовать для лечения инфекций, вызванных грибами рода *Candida* с множественной лекарственной устойчивостью, в т. ч. биопленок [12]. Поскольку точное взаимодействие природных соединений и структур биопленки не выяснено, необходимы дальнейшие токсикологические исследования *in vitro* и эксперименты на животных [10].

Антибиопленочная активность компонентов эфирных масел в отношении *Candida*.

Различные молекулы природного происхождения, включая компоненты эфирных масел, характеризуются наличием антигрибковой, антимикробной и противовирусной активности, в т. ч. в отношении COVID-19. Ранее для ряда эфирных масел были показаны противогрибковые свойства, например, масла гвоздики и корицы значительно подавляли рост устойчивых к флуконазолу штаммов *C. albicans*. Эфирное масло розмарина демонстрирует противогрибковое действие в отношении *C. albicans* и *Aspergillus niger*, а масло жасмина – в отношении дерматофитов. Антимикробная активность эфирных масел в основном обусловлена рядом фенольных, спиртовых и терпеноидных соединений, содержащихся в их составе [13].

Основными компонентами большинства эфирных масел являются: тимол, карвакрол, эвгенол, терпинен-4-ол, линалоол, герианиол.

Тимол (2-изопропил-5-метилфенол) представляет собой изомерный фенольный монотерпен с сильным запахом и хорошей растворимостью в спирте и других органических растворителях, но плохо растворим в воде. Тимол в изобилии содержится в таких растениях, как тмин (*Carum copticum*), тимьян обыкновенный (*Thymus vulgaris*) и чабер садовый (*Satureja hortensis* L), и уже много лет используется в традиционной медицине из-за его противоревматических, антиоксидантных, антисептических, противораковых, противовирусных, антибактериальных и противогрибковых фармакологических свойств [14]. Кроме того, продемонстрировано, что тимол может ингибировать образование биопленки и обладает способностью снижать количество жизнеспособных клеток грибка, а также уничтожать зрелые биопленочные сообщества *Candida*, в частности *C. tropicalis*. Эфирные масла из *Carum copticum* и *Thymus vulgaris* могут снижать выработку гемолитина и протеиназы у видов *Candida* [15].

Дополнительно показано синергическое действие тимола и противогрибковых препаратов (итраконазола и флуконазола) на лекарственно-устойчивые штаммы

C. albicans и *C. tropicalis*. Механизм действия тимола на уменьшение образования биопленки этих грибов был вызван либо предотвращая прикрепление к субстрату, либо препятствуя последующему созреванию биопленки. В частности, выявлены деформированные структуры и дезагрегация клеток сообщества биопленки *C. albicans* и снижение образования гиф в клетках биопленки *C. tropicalis* при субминимальных ингибирующих концентрациях тимола. Интересно, что тимол оказывал значительное влияние на структуру сформированной биопленки как *C. tropicalis*, так и *C. albicans*. Тимол также продемонстрировал синергизм с флуконазолом против планктонных и биопленочных сообществ *C. tropicalis* и *C. albicans*. Тем не менее синергизм с амфотерицином В был очевиден только в планктонных клетках *Candida* [16].

Карвакрол – фенольный монотерпеноид, компонент эфирных масел орегано (*Origanum vulgare*), перечное растение (*Lepidium flavum*) и тимьян (*Thymus vulgaris*). Недавние исследования выявили различную биологическую активность карвакрола, включая антиоксидантную, противораковую и противомикробную. Карвакрол заметно снижает как метаболическую активность, так и биомассу зрелой биопленки и разрушает биопленки штаммов, устойчивых к азолу. При этом наблюдается потеря жизнеспособности клеток биопленки *Candida* [14]. Эфирное масло *Origanum majorana* L, основным ингредиентом которого является карвакрол, проявляет противогрибковую и антибиопленочную активность в отношении *C. albicans*. В дополнение к ингибированию биопленки эфирное масло также подавляло образование зародышевой трубки – одного из основных факторов вирулентности *C. albicans*. Таким образом, карвакрол предотвращал образование биопленок, разрушал биопленки зрелых *C. albicans* и подавлял различные факторы вирулентности этого гриба [17].

Эвгенол или 2-метокси-4-[2-пропенил]фенол, – фенольное ароматическое соединение эфирных масел корицы и гвоздики – представляет собой природное микробиоцидное соединение, принадлежащее к классу фенилпропаноидных органических соединений. Эвгенол долгое время использовался в качестве анальгетика в стоматологии [12]. Данное соединение проявляет значительную противогрибковую активность в отношении различных видов грибов, в том числе дерматофитов *Aspergillus* и *Candida*, в первую очередь за счет повреждения клеточной оболочки грибов и ингибирующего действия в отношении биопленочных сообществ и различных факторов вирулентности. Эвгенол снижает адгезионную способность клеток и ингибирует образование биопленки у *C. albicans*. Кроме того, молекулярный докинг показал, что эвгенол воздействует на белок Als3 *C. albicans*, что может являться одним из механизмов ингибирования адгезии и образование биопленки *C. albicans* [13].

Терпинен-4-ол является монотерпеном и основным ингредиентом эфирного масла чайного дерева, а также большинства ароматических растений, включая *Artemisia absinthium*. В ряде исследований сообщается, что эфирное масло чайного дерева и его основной компонент терпинен-4-ол подавляют рост *C. albicans*, убивая планктонные формы, кроме того, терпинен-4-ол показал способность разрушения структуры биопленки этого грибка. Также комбинированное использование терпинен-4-ола и противогрибковых препаратов, таких как нистатин, обладает синергетическим эффектом в ингибировании биопленок *Candida*. Вероятными механизмами действия терпинен-4-ола является нарушение проницаемости клеточной мембраны *Candida* и повышение проникновения нистатина в более глубокие слои биопленок [18].

Линалоол – ненасыщенный монотерпеновый спирт, синтезируемый более чем 200 видами растений, принадлежащих к разным семействам. Это соединение является одним из основных ингредиентов различных эфирных масел, обладающих антиплазмодальными, противовоспалительными, антиноцицептивными и антибактериальными

свойствами. Линалоол является основным компонентом (29 %) эфирного масла иранского шалфея. Это эфирное масло в концентрациях 4–8 мкг/мл проявляло антибиопленочную активность в отношении различных видов *Candida* [19]. Другое исследование также показало, что богатое линалоолом эфирное масло из *Croton cajucara* ингибирует рост различных микроорганизмов в полости рта, в т. ч. *C. albicans*. Электронная микроскопия показала, что обработка линалоолом приводит к уменьшению размеров клеток гриба. Кроме того, линалоол потенциально ингибирует образование гиф *C. albicans*.

Молекулярный анализ показал, что линалоол снижает экспрессию различных патогенных генов у *C. albicans*, таких как ALS3 и HWP1 (связанные с адгезией гены), CPN1 и CYR1 (кодирующие компоненты митоген-активируемой протеинкиназы и cAMP-протеинкиназы А формирования гиф), а также EED1, HGC1 и UME6 (гены, ассоциированные с долговременным поддержанием роста гиф) [20].

Гераниол (транс-3,7-диметил-2,6-октадиен-1-ол) – представляет собой ациклический монотерпеновый спирт, обнаруженный в различных эфирных маслах таких растений, как герань, роза, лемонграсс и др. Известно, что гераниол не только подавляет планктонные клетки, но также разрушает структуру зрелой биопленки штаммов *C. glabrata*. Гераниол снижает содержание углеводов, а также активность гидролитических ферментов во внеклеточном матриксе *C. glabrata*. Данное соединение влияло на β -глюкан и хитин в клеточной стенке *C. glabrata*, снижало содержание эргостерола в клеточной мембране, изменяло активность митохондрий, повышало поглощение Ca^{2+} и блокировало насосы оттока лекарств ABC-транспортеров. Кроме того, выявлено, что экспрессия ERG4 и CDR1, которые связаны с биосинтезом эргостерола и транспортом оттока многих лекарств, соответственно, подавлялась гераниолом [21]. Также стало известно, что гераниол подавлял как образование биопленки, так и морфогенез гиф у *C. albicans*. Кроме того, это соединение вызывало снижение уровня эргостерола, изменение активности АТФазы плазматической мембраны, генотоксичность, нарушение регуляции гомеостаза и митохондриальную дисфункцию. Гераниол способен повышать активность флуконазола, подавляя активность специфических мембранных белковых насосов и разрушая внешнюю структуру кандид. Способность гераниола сенсibilизировать клетки *Candida* к флуконазолу открывает новые возможности комбинированной терапии, однако необходимы дополнительные исследования на животных моделях и клинические испытания, прежде чем применение этой комбинации станет реальностью [13].

Следует отметить, что существует ряд природных компонентов, присутствующих в небольшом количестве в эфирных маслах растений, но обладающих биологической активностью, которые также исследуются в отношении способности ингибировать и разрушать биопленку *Candida* (данные компоненты представлены в таблице).

Таблица – Компоненты эфирных масел и их активность в отношении биопленки *Candida* [22–25]

Компонент	Источник природного соединения	Виды <i>Candida</i>	Активность
Борнеол Камфен	Эфирное масло тимьяна	<i>C. albicans</i>	Разрушение предварительно сформированной биопленки
Цитраль	Эфирное масло лемонграсса	<i>C. albicans</i> <i>C. tropicalis</i>	Оказывает воздействие на белки биопленки, снижает жизнеспособность клеток и биомассы биопленки. Подавляет развитие гиф
Цинеол	Эфирное масло лаванды	<i>C. albicans</i>	Подавляет адгезию, морфогенез, образование биопленки, изменяет микроархитектуру и снижает жизнеспособность зрелой биопленки

Окончание таблицы

Геранилацетат	Эфирное масло из дикой моркови	<i>C. albicans</i>	Снижение биомассы и жизнеспособности биопленки
Лимонен	Приобретен у Sigma-aldrich	<i>C. albicans</i>	Эффективен против адгезии и дальнейшего созревания биопленки и имеет положительный и инергизм с флуконазолом против роста биопленки
Ментол	Приобретен у Sigma-aldrich и получен из эфирного масла мяты перечной	<i>C. albicans</i> <i>C. krusei</i> <i>C. glabrata</i> <i>C. parapsilosis</i> <i>C. dubliniensis</i>	Подавляет развитие биопленки, также в сочетании с имидазолом
Скополетин (натуральный кумарин)	Получен из растения митракарпус маквеллия	<i>C. tropicalis</i>	Подавляет образование удлиненных грибковых форм, снижает скорость роста и образование биопленки
α -пинен β -пинен	Эфирное масло из володушки	<i>C. albicans</i>	Подавляет образование зародышевых трубок и устраняет зрелую биопленку

Из данных таблицы видно, что основные исследования проводились в отношении биопленки *C. albicans*, что связано с ее частой встречаемостью и преимущественным выбором для лабораторных исследований. Но следует отметить, что также проводятся исследования биопленки других видов кандид. В основном природные компоненты воздействуют на способность клеток образовывать биопленку посредством влияния на образование гиф, а это, в свою очередь, связано с влиянием на генные механизмы образования биопленки.

Заключение

На сегодняшний день большинство исследований выполнено в суспензионных культурах, однако последствия для здоровья человека и эффективность лекарственных средств зависят от способности микроорганизмов формировать биопленку. Биопленка представляет собой сообщество адгезивных клеток со свойствами, отличными от свободно плавающих (планктонных) клеток.

В данном обзоре проанализированы особенности структурной организации и определены механизмы резистентности биопленки, а также охарактеризованы компоненты эфирных масел, способные ингибировать и разрушать биопленку клеток рода *Candida*. Продемонстрировано, что компоненты эфирных масел характеризуются наличием клеточных механизмов действия на клетки биопленки *Candida* и способны повысить эффективность противогрибковых препаратов. Эфирные масла можно рассматривать в качестве потенциального средства лечения инфекций, связанных с биопленкой, т. к. они содержат большое количество биологически активных веществ. Но стоит отметить существующие недостатки использования эфирных масел: низкую пероральную биодоступность, нерастворимость в воде, быстрый метаболизм и разложение, ограничивающие их клиническое применение. Решением может послужить использование различных платформ доставки лекарств (что должно оцениваться в будущих исследованиях), а также местное применение. Большинство исследований оценивали антибиопленочную эффективность природных соединений только в отношении *C. albicans*.

Таким образом, перспективными являются исследования, которые оценивают антибиопленочную активность природных соединений по отношению к другим клинически важным видам, таким как *C. tropicalis*.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Impact of infectious disease consultation in patients with candidemia: A retrospective study, systematic literature review, and meta-analysis / T. Kobayashi [et al.] // Open Forum Infect. Dis. – 2020. – Vol. 7. – P. 1–11. – DOI: 10.1093/ofid/ofaa270
2. The Patenting and Technological Trends in Candidiasis Treatment: A Systematic Review (2014-2018) / I. A. Alves [et al.] // Curr Top Med Chem. – 2019. – Vol. 19. – Nr 28. – P.2629–2639. – DOI: 10.2174/1568026619666191030091211
3. Antibiofilm Potential of Medicinal Plants against *Candida* spp. Oral Biofilms: A Review / R. Guimaraes [et al.] // Antibiotics (Basel). – 2021. – Vol. 10. – Nr 9. – Art. 1142. – DOI:10.3390/antibiotics10091142
4. Семитко, И. С. Биопленка как фактор патогенности грибков рода *Candida spp* / И. С. Семитко // Научный потенциал молодежи – будущему Беларуси : материалы XV междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Пинск, 9 апр. 2021 г. : в 2 ч. ; редкол.: В. И. Дунай [и др.]. – Пинск : ПолесГУ, 2021. – Ч. 2. – С. 132–133.
5. Eix, E. F. How Biofilm Growth Affects *Candida*-Host Interactions / E. F. Eix, J. E Nett // Front Microbiol. – 2020. – Vol. 11. – P. 1437. – DOI: 10.3389/fmicb.2020.01437
6. The relationship between biofilm formation and mortality in patients with *Candida tropicalis* candidemia. / E. Sasani [et al.] // Microb Pathog. – 2021. – Vol. 155. – Art. 104889. – DOI: 10.1016/j.micpath.2021.104889
7. Evaluation of the biofilm life cycle between *Candida albicans* and *Candida tropicalis* / M. B. Atencia-Carrera [et al.] // Front Cell Infect Microbiol. – 2022. – Vol. 12. – Art. 953168. – DOI: 10.3389/fcimb.2022.953168
8. *Candida* biofilms: An update on developmental mechanisms and therapeutic challenges / P. P. de Barros [et al.] // Mycopathologia. – 2020. – Vol. 185. – P. 415–424. – DOI: 10.1007/s11046-020-00445-w
9. *Candida* Species Biofilms' Antifungal Resistance / S. Silva [et al.] // J Fungi (Basel). – 2017. – Vol. 3. – Nr 1. – P. 80–90. – DOI: 10.3390/jof3010008.
10. Mechanistic Understanding of *Candida albicans* Biofilm Formation and Approaches for Its Inhibition / T. Atriwal [et al.] // Front Microbiol. – 2021. – Vol. 12. – Art. 638609. DOI: 10.3389/fmicb.2021.638609
11. Global proteomic analysis deciphers the mechanism of action of plant derived oleic acid against *Candida albicans* virulence and biofilm formation / S. Muthamil [et al.] // Sci Rep. – 2020. – Vol. 10. – Nr 1. – Art. 5113. – DOI: 10.1038/s41598-020-61918-y
12. Natural Compounds: A Hopeful Promise as an Antibiofilm Agent Against *Candida* Species / A. Shariati [et al.] // Front. Pharmacol. – 2022. – Vol. 13. – Art. 917787. – DOI: 10.3389/fphar.2022.917787
13. Back to Nature: Combating *Candida albicans* Biofilm, Phospholipase and Hemolysin Using Plant Essential Oils / A. M. El-Baz [et al.] // Antibiotics. – 2021. – Vol. 10. – P. 81–85. – DOI:10.3390/antibiotics10010081
14. Thymol and Carvacrol Supplementation in Poultry Health and Performance / M. Gholami-Ahangaran [et al.] // Vet. Med. Sci. – 2022. – Vol. 8. – P. 267–288. – DOI:10.1002/vms3.663
15. Characterization and Physical and Biological Properties of Tissue Conditioner Incorporated with *Carum Copticum* L / M. Hejazi [et al.] // Biomed. Res. Int. – 2021. – DOI:10.1155/2021/5577760
16. Jafri, H. *Thymus Vulgaris* Essential Oil and Thymol Inhibit Biofilms and Interact Synergistically with Antifungal Drugs against Drug-Resistant Strains of *Candida Albicans*

and *Candida tropicalis* / H. Jafri, I. Ahmad // J. Mycol. Med. – 2020. – Vol. 30. – Art. 100911. – DOI: 10.1016/j.mycmed.2019.100911

17. Antifungal and Anti-virulent Activity of *Origanum Majorana L.* Essential Oil on *Candida Albicans* and In Vivo Toxicity in the Galleria Mellonella Larval Model / B. Kaskatepe [et al.] // Molecules. – 2022. – Vol. 27, Nr 3. – P. 663. – DOI:10.3390/molecules27030663

18. Antibiofilm Efficacy of Tea Tree Oil and of its Main Component Terpinen-4-Ol against *Candida albicans* / R. S. Francisconi [et al.] // Braz Oral Res. – 2020. – Vol. 34. – Nr 50. – DOI:10.1590/1807-3107bor-2020.vol34.0050.

19. Chemical Compositions and Antifungal Activities of Satureja Macrosiphon against *Candida* and *Aspergillus* Species / M. Motamedi [et al.] // Curr. Med. Mycol. – 2019. – Vol. 5. – P. 20–25. DOI:10.18502/cmm.5.4.2162

20. Inhibitory Effects of the Essential Oils α -longipinene and Linalool on Biofilm Formation and Hyphal Growth of *Candida albicans* / R. K. Manoharan [et al.] // Biofouling. – 2017. – Vol. 33. – P. 143–155. – DOI:10.1080/08927014.2017.1280731

21. Gupta, P. Geraniol Eradicates *Candida Glabrata* Biofilm by Targeting Multiple Cellular Pathways / P. Gupta, H. Gupta, K. M. Poluri // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2021. – Vol. 105. – P. 5589–5605. – DOI:10.1007/s00253-021-11397-6

22. Chemical Characterization of Lavandula Dentata Essential Oil Cultivated in Chile and its Antibiofilm Effect against *Candida albicans* / A. Müller-Sepúlveda [et al.] // Planta Med. – 2020. – Vol. 86. – P. 1225–1234. – DOI:10.1055/a-1201-3375

23. Limonene Inhibits *Candida albicans* Growth by Inducing Apoptosis / A. Thakre [et al.] // Med. Mycol. – 2018. – Vol. 56. – P. 565–578. – DOI:10.1093/mmy/myx074

24. Suchodolski, J. Antiadhesive Properties of Imidazolium Ionic Liquids Based on (-)-Menthol against *Candida spp* / J. Suchodolski, J. Feder-Kubis, A. Krasowska // Int. J. Mol. Sci. – 2021. – Vol. 22. – Art. 7543. – DOI:10.3390/ijms22147543

25. Antifungal Activity of the Natural Coumarin Scopoletin against Planktonic Cells and Biofilms from a Multidrug-Resistant *Candida tropicalis* Strain / A. S. O. Lemos [et al.] // Front. Microbiol. – 2020. – Vol. 11. – Art. 1525. DOI:10.3389/fmicb.2020.01525.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 27.09.2023

НАВУКІ АБ З'ЯМЛІ

УДК 550.42 (476.5)

Александр Николаевич Галкин¹, Алексей Васильевич Матвеев²

*¹д-р геол.-минерал. наук, проф., проф. каф. экологии и географии
Витебского государственного университета имени П. М. Машерова*

*²д-р геол.-минерал. наук, проф., академик Национальной академии наук Беларуси,
гл. науч. сотрудник лаб. современной геодинамики и палеогеографии
Института природопользования Национальной академии наук Беларуси*

Alexander Galkin¹, Alexey Matveev²

*¹Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of the Department
of Ecology and Geography of Vitebsk State University named after P. M. Masherov*

*²Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor,
Academician of the National Academy of Sciences of Belarus,
Chief Researcher of Laboratory of Modern Geodynamics and Paleogeography
of Institute for Nature management of National Academy of Sciences of Belarus*

e-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОЛЩИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТИ*

Рассмотрены особенности распределения макро- и микроэлементов в четвертичных отложениях на территории Витебской области. По результатам анализа полученных данных определены ведущие геохимические ассоциации элементов в четвертичной толще, оценена степень их унаследованности от подстилающих пород, составлена схема территориального распределения этих ассоциаций.

Ключевые слова: четвертичные отложения, геохимия, макроэлементный состав, микроэлементы.

Geochemical Features of the Quaternary Deposits in the Vitebsk Region

The features of the distribution of macro- and microelements in the Quaternary deposits on the territory of the Vitebsk region are considered. Based on the results of the analysis of the obtained data, the leading geochemical associations of elements in the Quaternary sequence were determined, the degree of their inheritance from the underlying rocks was assessed, and a scheme of the territorial distribution of these associations was drawn up.

Key words: Quaternary deposits, geochemistry, macroelement composition, microelements.

Введение

Геохимические исследования четвертичных отложений на территории Витебской области, как и всей Беларуси в целом, широко развернулись в 1950-х гг. под руководством академика К. И. Лукашева. Им и работавшими под его руководством сотрудниками (С. Д. Дромашко, В. А. Ковалевым, В. А. Кузнецовым, В. К. Лукашевым, Н. Н. Петуховой, А. А. Хомичем и др.) был получен и обобщен ценный материал о миграции, статистических показателях распределения основных химических элементов и аккумуляции их в различных генетических типах четвертичных отложений, в почвах и растительных сообществах, выделены и изучены биогеохимические и гидрохимические

**Работа выполнена в рамках задания 10.4.02 «Разработка геолого-информационных моделей кайнозойских отложений территории Беларуси для прогнозирования новых наиболее доступных месторождений минерального сырья и управления минерально-сырьевой базой» подпрограммы 10.4 «Белорусские недра» Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг.*

провинции, геохимические ландшафты и фации Беларуси, вопросы корреляции покровных образований и т. д. [4]. Кроме научных сотрудников, в эти же годы в изучении геохимии четвертичных отложений принимали участие геологи производственных организаций. При этом надо заметить, что до 1960 г. при геолого-съёмочных и поисково-разведочных работах содержание различных химических элементов в породах и подземных водах регистрировались лишь на локальных участках. Выводы, основанные на обобщении и систематизации материала, как правило, не делались. В то же время, начиная с 1963 г., геохимические методы исследований стали более широко применяться при проведении геолого-съёмочных работ, но в основном – для решения ряда геологических проблем. С конца 1960-х годов успешно изучались геохимические особенности отдельных генетических типов четвертичных отложений, поведение тех или иных элементов в четвертичной толще (Я. И. Аношко, С. Д. Астапова, Н. Н. Бамбалов, С. В. Бордон, Б. Н. Гурский, Г. В. Гурский, С. Г. Дромашко, А. Л. Жуховицкая, Н. В. Зайцева, В. Б. Кадацкий, В. А. Ковалев, В. А. Кузнецов, А. В. Матвеев, Л. И. Матрунчик, М. П. Оношко, Н. Н. Петухова, Н. Н. Чертко, С. Л. Шиманович, Е. С. Шляппо, В. И. Ярцев и др.). Одновременно с накоплением геохимических данных стали проводиться работы по геохимическому картированию территории страны. Они преследовали самые различные цели – от прогноза полезных ископаемых и их поиска до решения разных геологических задач (расчленение разрезов и их корреляция, выявление условий осадконакопления и т. д.).

В 1960-х гг. под руководством К. И. Лукашева были созданы первые мелкомасштабные геохимические карты покровных отложений с выделением специализированных провинций, а также почвенно-геохимические, гидрогеохимические и другие карты [4; 8]. В 1970–1975 гг. В. Е. Бордоном было выполнено геохимическое районирование ложа четвертичных отложений территории страны и составлена соответствующая мелкомасштабная карта. В 1980 г. составлена мелкомасштабная «Геохимическая карта антропогенных отложений Беларуси» на основе ландшафтного районирования Беларуси с выделением ведущих геохимических ассоциаций элементов и их уровней накопления в типах ландшафтов [2; 3]. В 1987–1999 гг. создана серия мелкомасштабных почвенно-геохимических карт территории Беларуси, отражающих последствия аварии в районе Чернобыльской АЭС. С. В. Бордоном и В. К. Лукашевым и другими исследователями построены геохимические карты территорий некоторых городов республики. В 2001 г. под руководством А. В. Матвеева была подготовлена геохимическая карта антропогенных отложений Беларуси масштаба 1 : 500000, на которой показана их геохимическая специализация, выделены геохимические ассоциации элементов, проведено геохимическое районирование территории.

Значительным событием в изучении геохимии четвертичных отложений территории страны, в т. ч. и Витебской области, стал выход в 2013 г. монографии А. В. Матвеева и В. Е. Бордона «Геохимия четвертичных отложений Беларуси» [9], в которой дана характеристика регионального (площадного) распределения основных породобразующих и микроэлементов, приведены кларки этих элементов, выявлены ведущие геохимические ассоциации.

Обобщение всех рассмотренных выше результатов работ позволяет с наибольшей полнотой охарактеризовать геохимические особенности четвертичных отложений на территории Витебского региона.

Материалы и методы исследований

В основу работы положены результаты анализа существующих опубликованных и фондовых научных и картографических работ по геохимии четвертичных отложений

Беларуси. В ходе выполнения работы использовались сравнительно-географический, экспертный, описательный и геоинформационный методы.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ картографических геохимических данных по макроэлементному составу четвертичных отложений Беларуси [9], свидетельствует о том, что содержание наиболее распространенных в четвертичной толще Витебской области оксидов кремния (SiO_2) относительно невелико по сравнению с другими областями республики и изменяется в интервале величин от 68,0 до 78,0 % (по массе), причем их минимальные значения, как правило, тяготеют к площадям, характеризующимся преобладанием в четвертичном разрезе моренных и озерно-ледниковых отложений. В то же время распределение оксидов алюминия (Al_2O_3) в рассматриваемой толще имеет обратную картину. Как показали исследования, наибольшее их содержание (10,0–13,0 % и более) выявлено на площадях, где в разрезе преобладают в основном моренные глинистые образования.

Четвертичные породы на территории Витебского региона, как и всей страны в целом, отличаются значительной ожелезненностью состава, поэтому содержание оксидов железа (Fe_2O_3) здесь достаточно велико. Наибольшее их количество (4–5 % и более) установлено примерно в тех же районах, где повышены концентрации окислов алюминия, что связано с широким распространением глинистых отложений.

Количество CaO в четвертичных отложениях области в основном изменяется в интервале 0,8–3,1 %. Максимальное их содержание (3,4 % и выше) установлено на участках, характеризующихся небольшой мощностью четвертичной толщи и залеганием в ее основании девонских известняков и доломитов.

Подобная картина наблюдается и в отношении содержания MgO в четвертичных отложениях, повышенные концентрации которых (2,0 % и выше) хорошо увязываются с распространением в субчетвертичном ложе девонских карбонатных пород.

Распределение содержаний K_2O в четвертичных отложениях подобно схемам территориального распространения Al_2O_3 и Fe_2O_3 , т. е. максимальные значения (2,0–3,0 % и более) установлены на тех площадях, где в четвертичном разрезе преобладают в основном глинистые образования.

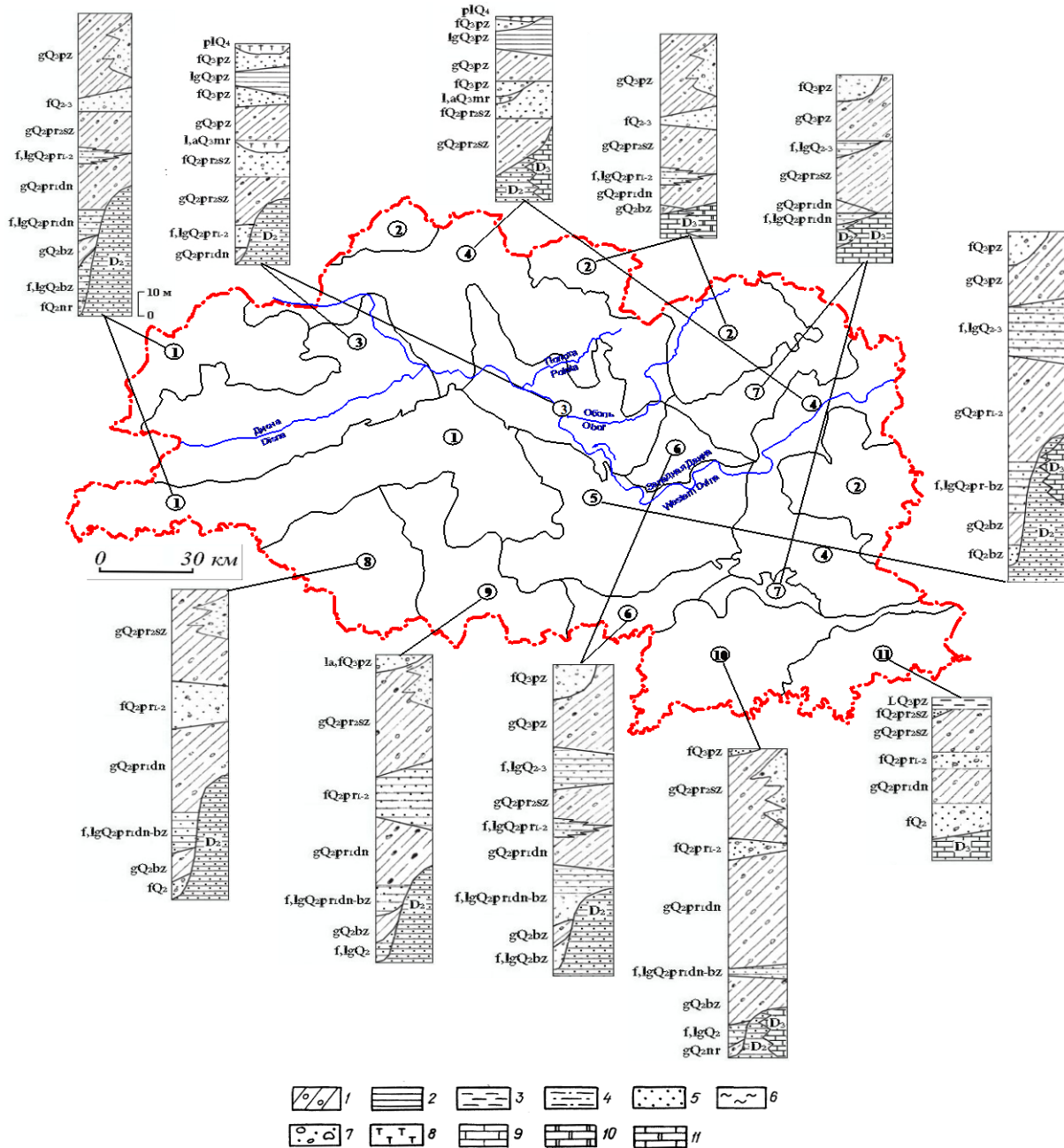
И, наконец, количество Na_2O в рассматриваемых толщах отложений изменяется в небольших пределах (0,35–0,45 %), причем их низкие величины наиболее характерны для участков распространения в массивах четвертичных пород озерно-ледниковых отложений значительной мощности.

Определенный интерес представляют особенности содержания микроэлементов в четвертичных образованиях Витебского региона. При этом следует отметить, что строение и состав четвертичной толщи на исследуемой территории отличается невыдержанностью по простиранию и мощности генетических типов и фаций отложений, залеганием на одном уровне разновозрастных и разнофациальных аккумуляций.

В связи с этим для установления геохимических особенностей содержания микроэлементов в четвертичной толще целесообразно использовать типовые разрезы, которые не отражают строение какого-либо конкретного участка, а являются в определенной степени усредненной или генерализованной характеристикой [1].

С этой целью на основании анализа стратиграфической полноты разрезов, мощности четвертичных отложений в целом и их отдельных слоев, особенностей литологического состава, пространственного распределения основных генетических типов и их доли в общем объеме четвертичной толщи, характере строения ее ложа и рельефа земной поверхности нами были выделены и описаны одиннадцать типов четвертичных разрезов в пределах Витебского региона, формирующих своеобразные литогенетические поля (рисунок 1).

Последующие аналитические исследования геохимических данных [9], позволили установить в них различия по уровню накопления – рассеяния микроэлементов и выделить геохимические ассоциации ведущих элементов, присущие какому-либо одному литогенетическому полю или группе полей.



1 – моренные отложения; 2 – глина; 3 – суглинок; 4 – супесь; 5 – песок; 6 – алеврит; 7 – галька и валуны; 8 – торф, гиттии; 9 – известняк; 10 – доломит; 11 – доломитизированный известняк

Рисунок 1 – Типы геологических разрезов четвертичных отложений в пределах Витебской области

В таблице 1 приведены средние содержания элементов в каждом поле и для сравнения указаны их кларки в четвертичной толще Беларуси [6].

Таблица 1 – Среднее содержание микроэлементов в литогенетических полях Витебской области (по [9]), г/т

Химический элемент	Литогенетическое поле											Кларк по [6]	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10а	10б		11
Ni	17,1	15,0	19,5	10,3	3,2	12,7	8,1	15,3	9,5	11,4	8,6	10,1	11,9
Co	12,8	11,5	15,6	7,6	10	10,1	9,3	6,7	2,7	14,6	1,4	5,9	7,8
V	28,5	41,7	44,5	69,2	6,4	38,6	54,7	37	18,8	50	21,3	38	29,0
Mn	481,6	750,0	486,9	1030	116,9	776	1115,6	391	711,9	634	575	403,5	369,3
Ti	3 047,7	3 666,6	3 478	4 257	527,8	3 520	4 343,8	2 349,7	2 619	3 033,3	2 685	2 320,2	2 170,4
Cr	38,9	–	79,0	215,4	1,4	–	–	31,4	–	31	–	20,5	34,2
Pb	13,0	10,3	15,6	21,0	10,0	10,4	23,1	10,7	9,7	16,6	12,1	36,5	14,9
Mo	1,1	1,0	1,1	1,3	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
W	3,0	3,0	3,0	–	–	3,0	–	5,25	3,0	3,0	–	3,0	3,0
Zr	150	140	150,5	194,8	25,1	140	275	256	61,2	128,8	70,5	248,1	182,2
Nb	8,3	7,5	9,5	7,1	6	5,1	8,1	3,3	3,4	6,4	3,2	4,4	6,2
Cu	11,4	10,7	12,4	12,2	1,2	9	9,2	10,2	7,7	15,1	8,2	8,3	16,2
Ag	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	–	–	1,7	–	1,0	1,0
Zn	52,0	30	69,5	66,7	–	31,7	71	30	30	32	35	50	36,6
Ge	1,0	1,0	1,2	1,0	–	1,0	1,0	–	1,0	1,0	–	1,0	1,1
Yb	3,8	–	3,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,7	2,7	2,8	3,3	2,5	2,8
Y	16,4	10,8	14,3	–	10,0	10,2	17,8	11,1	10,0	18,8	11,2	16,1	13,9
Bi	1,0	1,0	1,0	1,0	–	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Ga	26,0	5,3	28,9	15,1	5,0	4,4	15,3	6,9	4,7	15,8	4,9	14,5	16,2
Sc	10,2	–	10,4	10	–	–	10,0	10,0	–	10,0	–	10,0	10,0
Sn	1,8	2,8	2,6	4,9	2,0	3,0	5,2	2,2	2,4	2,3	2,5	5,8	2,4
Cd	10,0	–	10,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,6
P	383,0	550,0	654,3	1 879,6	300,0	744,0	1 240,6	290,6	595,2	540,0	355,0	1 130,0	525,7
Sr	100,6	100	100	94,4	100	100	100	116,7	100	100	100	100,0	109,8
Ba	111,7	100	167,5	600	25	100	–	277,1	100	96,5	100	100,0	107,2
Li	12,6	10	13,1	10	10	10	10	10	10	10	10	10,0	11,4
B	18,5	34,2	24,6	29,4	20	38	19,7	20	18,2	34	18,8	29,0	18,5

В *первом* литогенетическом поле содержание выше кларка наблюдается у Ni, Co, Mn, Ti, Cr, Nb, Zn, Y, Ga, Sc, Cd, Ba, Li; во *втором* – Ni, Co, V, Mn, Ti, Nb, P, B (на участках второго литогенетического поля в северной части региона состав и концентрация микроэлементов, согласно исследованиям А. В. Матвеева и В. Е. Бордона (2013), идентичны таковым первого литологического поля); в *третьем* – Ni, Co, V, Mn, Ti, Cr, Pb, Nb, Zn, Y, Ga, Cd, P, Ba, Li, B; *четвертом* – V, Mn, Ti, Cr, Pb, Zr, Nb, Zn, Sn, P, Ba, B; *пятом* – Co; *шестом* – Ni, Co, V, Mn, Ti, P, B; *седьмом* – Co, V, Mn, Ti, Pb, Zr, Nb, Y, P; *восьюмом* – Ni, V, Mn, Ti, W, Zr, Sr, Ba; *девятом* – Mn, Ti, P; *десятым* – Co, V, Mn, Ti, Pb, Y, P, B; в *одиннадцатом* поле – у V, Mn, Ti, Pb, Zr, Zn, Y, Sn, P, B.

Из приведенных данных следует, что наибольшим многообразием микроэлементов, превышающих кларк, отличаются *первое*, *третье* и *четвертое* литогенетические поля. Причем для первого и третьего полей характерны высокое относительно кларка содержание в составе отложений Nb, Zn и Cd, а в четвертом поле – Cr, Zn, P и Ba. Практически во всех литогенетических полях, за исключением пятого, содержатся в повышенных концентрациях Mn и Ti.

В пределах некоторых литогенетических полей наблюдаются колебания содержания элементов в зависимости от подстилающих четвертичную толщу девонских терригенных или карбонатных пород. Наиболее ярко это выражено в *десятом* поле (таблица 1). Здесь, на восточном участке, где субчетвертичная поверхность сложена сменяющимися по мере продвижения на восток песчано-глинистыми отложениями среднего девона и верхнедевонскими доломитами и известняками, количественный состав и концентрация микроэлементов несколько выше, чем на западном участке, где в ложе четвертичной толщи залегают среднедевонские песчаные породы.

Особого внимания заслуживают *пятое* и *девятое* литогенетические поля, где в четвертичной толще выше кларка содержится лишь один (Co) и три (Mn, Ti, P) микроэлемента соответственно. Это объясняется, по всей вероятности, сочетанием специфики геохимии самих элементов, строения толщи четвертичных отложений и подстилающих их пород, гидрогеологических условий и природных особенностей территорий этих полей. Так, в пределах рассматриваемых полей в разрезе четвертичной толщи относительно высока доля слабопроницаемых глинистых пород, субчетвертичная поверхность сложена преимущественно песчаными породами среднего девона, глубина залегания грунтовых вод значительная, основной подземный сток формируется главным образом за счет вод, заключенных в подморенных и межморенных флювиогляциальных песках и супесях; для территорий характерны высокая степень заозеренности и лесистости (в пределах пятого литогенетического поля), а также значительная заболоченность и заторфованность (в девятом поле).

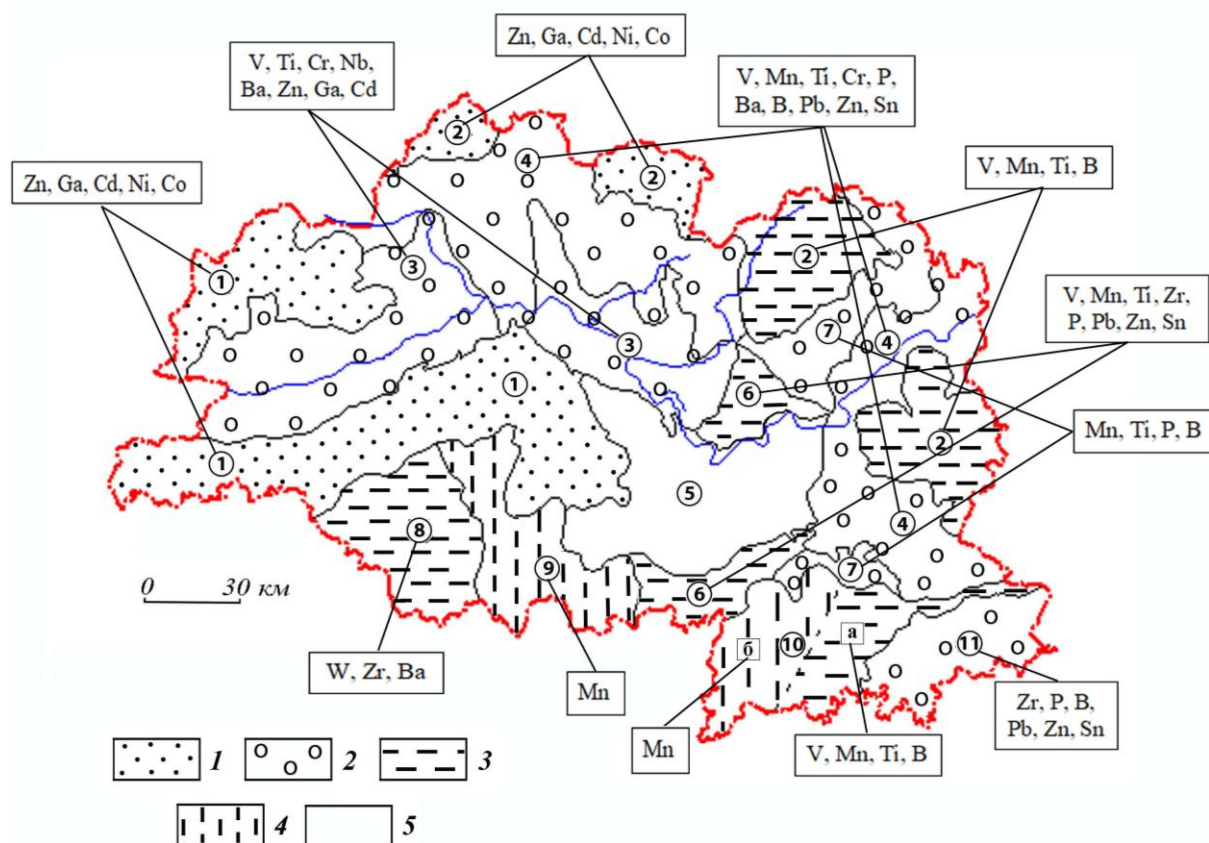
Как видно из анализа, распределение содержания микроэлементов в четвертичных отложениях Витебской области носит достаточно пестрый характер. В то же время, если рассматривать содержание элементов с коэффициентом концентрации $R = 1,0-1,4$ (где R – это отношение содержания элемента к его региональному кларку), то возникает возможность выделить геохимические ассоциации ведущих элементов, присущие какому-либо одному литогенетическому полю или группе полей.

Выделение геохимических ассоциаций элементов проводилось по методике А. А. Смыслова [10; 11], суть которой заключалась в определении реальных содержаний элементов в однородном геохимическом поле, подсчете коэффициентов концентрации каждого элемента относительно кларка литосферы и их классификации. Элементы, попадающие в классификации в одну группу, составляют единую ассоциацию.

Сопоставление среднего содержания микроэлементов в литогенетических полях региона с их кларками в четвертичных отложениях территории Беларуси позволило рассчитать коэффициенты концентрации этих элементов и на их основании выделить

геохимические ассоциации, при этом в учет принимались лишь те элементы, которые имели наибольшие коэффициенты концентрации (в основном 1,1–1,4). Дифференция геохимических ассоциаций проводилась в соответствии с классификацией В. М. Гольдшмидта [7].

По полученным данным была построена схематическая карта, отражающая пространственное распределение относительно выделенных литогенетических полей в четвертичных отложениях Витебской области ведущих геохимических ассоциаций элементов (рисунок 2).



Ассоциации: 1 – халькосидерофильная (Zn, Ga, Cd, Ni, Co); 2 – литохалькофильная (преобладают V, Ti, Ba, Zn, P, Pb, Sn); 3 – литофильная (преобладают Mn, Ti, B, Ba); 4 – повышенные концентрации Mn; 5 – не выявлены

Рисунок 2 – Ведущие ассоциации элементов в четвертичных отложениях на территории Витебской области (по [9])

Судя по схеме, для четвертичных пород крайних северной и западной частей региона характерна халькосидерофильная ассоциация, значительные площади в северной, центральной, западной и восточных частях области занимает литохалькофильная ассоциация, литофильная – получила распространение на юге и востоке Витебщины. Отмеченная территориальная локализация основных геохимических ассоциаций, несомненно, связана с особенностями накопления ледниковых отложений, в формировании которых участвовал как дальнепринесенный, так и местный материал. По этим причинам вполне допустимо предположение, что геохимические особенности четвертичных отложений частично являются унаследованными от состава подстилающих пород, что представляет практический интерес, поскольку позволяет по геохимическим аномалиям в четвертичной толще прогнозировать высокие содержания тех или иных элементов

в коренных породах [9]. Сопоставление полученных данных с геохимическими данными дочетвертичных отложений [5] показало, что выделенная в пределах Витебской области халькосидерофильная ассоциация в общих чертах соответствует сидерофильной ассоциации карбонатной и глинисто-карбонатной формаций верхне- и среднедевонских пород, а литохалькофильная ассоциация отложений на территории региона коррелируется с площадями распространения литофильной и халькофильной ассоциаций песчано-глинистой формации среднего девона. Следовательно, можно констатировать тот факт, что геохимические особенности четвертичной толщи на территории Витебской области, как и всей Беларуси в целом, в значительной степени являются унаследованными от состава подстилающих дочетвертичных пород. В то же время следует заметить, что формирование четвертичных отложений в условиях неоднократных вторжений ледниковых покровов обусловило определенное смещение в дистальном направлении аномалий и геохимических ассоциаций элементов в рассматриваемой толще и подстилающих породах. Помимо этого, за счет привноса ледниками обломочного материала из центров оледенения и территорий, по которым двигались ледниковые покровы, в четвертичных отложениях сформировались и новообразованные аномалии Ni, Cr, Mn, Ti, Sr, Co и др. [9].

Заклучение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Установлено, что содержание химических элементов в четвертичных отложениях на территории Витебского региона носит достаточно пестрый характер.
2. Выявлены различия выделенных литогенетических полей по уровню накопления – рассеяния микроэлементов. По полученным данным определены ведущие геохимические ассоциации элементов в четвертичной толще, оценена степень их унаследованности от подстилающих пород, составлена схема территориального распределения этих ассоциаций.
3. Показано, что геохимические особенности четвертичных отложений на территории Витебской области, как и Беларуси в целом, в основном объясняются своеобразием ледникового литогенеза, мощностью четвертичной толщи, а также составом подстилающих пород.
4. Результаты исследований могут представлять определенный практический интерес. Их можно использовать для обоснования направлений геологоразведочных работ, при разработке мероприятий по улучшению общей экологической ситуации в регионе и отдельных районах, размещении сельскохозяйственного производства, выделении рекреационных зон и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдасаров, М. А. Геология и минерагения четвертичных отложений территории Подляско-Брестской впадины / М. А. Богдасаров. – Брест : БрГУ, 2011. – 167 с.
2. Бордон, В. Е. Геохимия и металлоносность осадочного чехла Белоруссии / В. Е. Бордон. – Минск : Наука и техника, 1977. – 216 с.
3. Бордон, В. Е. Геохимия мезозойских отложений Белоруссии / В. Е. Бордон, Е. Т. Ольховик. – Минск : Выш. шк., 1974. – 177 с.
4. Геохимические провинции покровных отложений БССР / под ред. К. И. Лукашэва. – Минск : Наука и техника, 1969. – 476 с.
5. Геахімічная карта дачацвярцічных адкладаў [Карта]. – 1 : 400 0000 / Я. І. Аношка [і інш.] / Нац. атлас Беларусі ; гал. рэдкал.: М. У. Мясніковіч [і інш.]. – Мінск : Кам.

па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэсп. Беларусь, 2002. – С. 69.

6. Кларки микроэлементов в четвертичных отложениях Беларуси / В. Е. Бордон [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2002. – Т. 46, № 6. – С. 85–86.

7. Краткий справочник по геохимии / Г. В. Войткевич [и др.]. – М. : Недра, 1970. – 280 с.

8. Лукашэў, К. И. Геохимия ландшафтов / К. И. Лукашэў, В. К. Лукашэў. – Минск : Выш. шк., 1972. – 358 с.

9. Матвеев, А. В. Геохимия четвертичных отложений Беларуси / А. В. Матвеев, В. Е. Бордон. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 191 с.

10. Скублов, Г. Т. Принципы составления полиэлементных геохимических карт / Г. Т. Скублов. – Л. : Недра, 1983. – 58 с.

11. Смыслов, А. А. Геохимические эпохи и провинции и их металлогеническая специализация / А. А. Смыслов // Тр. ВСЕГЕИ. – 1975. – Т. 241. – С. 5–18.

REFERENCES

1. Bogdasarov, M. A. Geologija i minieragienija chietviertichnykh otlozhenij tierri-torii Podljassko-Briestskoj vpadiny / M. A. Bogdasarov. – Brest : BrGU, 2011. – 167 s.

2. Bordon, V. Ye. Geokhimija i mietallonosnost' osadochnogo chiekhla Bielarusi / V. Ye. Bordon. – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1977. – 216 s.

3. Bordon, V. Ye. Geokhimija mezozojskikh otlozhenij Bielarusi / V. Ye. Bordon, Ye. T. Ol'khovik. – Minsk : Vysh. shk., 1974. – 177 s.

4. Geokhimichieskije provincii pokrovnykh otlozhenij BSSR / pod ried. K. I. Luka-shova. – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1969. – 476 s.

5. Geokhimichnaja karta dachatsvjartsichnykh adkladau [Kartta]. – 1 : 400 0000 / Ya. I. Anoshka [i insh.] / Nac. atlas Bielarusi ; hal. redkal.: M. U. Miasnikovich [i insh.]. – Minsk : Kam. pa ziamioel'nykh resursakh, hieadezii i kartahrafiu pry Saviecie Ministrau Resp. Bielarus', 2002. – S. 69.

6. Klarki mikroeliementov v chietviertichnykh otlozhenijakh Bielarusi / V. Ye. Bor-don [i dr.] // Dokl. NAN Bielarusi. – 2002. – Т. 46, № 6. – S. 85–86.

7. Kratkij spravochnik po gieokhimii / G. V. Vojtkievich [i dr.]. – M. : Niedra, 1970. – 280 s.

8. Lukashov, K. I. Geokhimija landshaftov / K. I. Lukashov, V. K. Lukashov. – Minsk : Vysh. shk., 1972. – 358 s.

9. Matviejev, A. V. Geokhimija chietviertichnykh otlozhenij Bielarusi / A. V. Mat-viejev, V. Ye. Bordon. – Minsk : Bielarus. navuka, 2013. – 191 s.

10. Skublov, G. T. Principy sostavlienija polieliementnykh gieokhimichieskikh kart / G. T. Skublov. – L. : Niedra, 1983. – 58 s.

11. Smyslov, A. A. Geokhimichieskije epokhi i provincii i ikh mietallogienichieskaja spicializatsija / A. A. Smyslov // Tr. VSEGEI. – 1975. – Т. 241. – S. 5–18.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 30.08.2023

УДК 551.2+550.46

Андрей Петрович Гусев*канд. геол.-минерал. наук, доц., зав. каф. геологии и географии
Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины***Andrei Gusev***Candidate of Geological and Mineralogical Science, Associate Professor,
Dean of the Faculty of Geology and Geography of Francisk Skorina Gomel State University
e-mail: gusev@gsu.by*

ПОТОКИ МЕТАНА В ТРОПОСФЕРЕ КАК ИНДИКАТОР СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОКА БЕЛАРУСИ)*

На основе съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI изучено содержание метана в тропосфере над территорией юго-востока Беларуси. Исследована пространственная структура и колебания во времени потоков метана в зависимости от тектонического строения. Определен региональный фон тропосферного метана в летний, осенний и зимние периоды. Фоновое содержание метана в тропосфере изменялось от 1824,9 (лето 2021 г.) до 1891,3 (зима 2023 г.). Выявлено, что изменения потока метана имеют сезонный характер (повышение зимой, снижение летом). Изучена динамика содержания метана в тропосфере над узлами космолинеаментов. Предложены критерии и выполнена оценка геодинамической активности узлов космолинеаментов. Установлено, что наиболее высокая геодинамическая активность характерна для узла «Добруш» (расположен в Клинецовском грабене Воронежской антеклизы).

Ключевые слова: метан, Sentinel-5P, TROPOMI, космолинеаменты, геодинамическая активность, Беларусь.

The Tropospheric Methane Flows as an Indicator of Contemporary Geodynamic Activity (on the Example of the South-East of Belarus)

Based on the imagery of the Sentinel-5P TROPOMI satellite, the content of methane in the troposphere over the territory of the south-east of Belarus was studied. The spatial structure and fluctuations in time of methane fluxes depending on the tectonic structure have been studied. The regional background of tropospheric methane in summer, autumn and winter periods has been determined. The background content of methane in the troposphere varied from 1824,9 (summer 2021) to 1891,3 (winter 2023). It is revealed that changes in the methane flux are seasonal (increase in winter, decrease in summer). The dynamics of methane content in the troposphere above the nodes of cosmolineaments has been studied. Criteria are proposed and an assessment is made of the geodynamic activity of cosmolineament nodes. It has been established that the highest geodynamic activity is characteristic of the Dobrush node (located in the Klintsovsky graben of the Voronezh antecline).

Key words: methane, Sentinel-5P, TROPOMI, cosmolineaments, geodynamic activity, Belarus.

Введение

Метан – газ, играющий важную роль в биосфере и являющийся одним из парниковых газов, содержания которых определяют климат Земли. Время жизни метана составляет $9,7 \pm 1,1$ года. Парниковый эффект от метана примерно в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа. В индустриальную эпоху (с 1750 г.) концентрация метана в атмосфере Земли увеличилась с 600–700 до 1 800 ppb и более [1]. Естественные потоки метана составляют от 183 до 248 млн т в год с наиболее вероятной оценкой 215 млн т/год. Среди природных источников метана доминируют: болота и переувлажненные земли (177–284 млн т/год), пресноводные водоемы (8–73 млн т/год), термиты (2–22 млн т/год). На геологические источники приходится 33–75 млн т/год. Антропогенные потоки метана в атмосферу оцениваются в 357 (336–375) млн т/год [1]. Среди антропогенных источников метана доминируют: крупный рогатый скот (87–94 млн т/год), рисоводство (33–44 млн т/год), мусор (67–90 млн т/год), сжигание биомассы (29–36 млн т/год).

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X23КИ-022).*

Метан выделяется в атмосферу в результате таких процессов, как деятельность микроорганизмов на заболоченных территориях, деятельность микроорганизмов в водоемах (реках, озерах), пожары, пищеварение жвачных животных (бактериальная ферментация в желудочно-кишечном тракте), жизнедеятельность насекомых, анаэробное бактериальное разложение органики на дне морей и океанов, таяние многолетней мерзлоты (метан здесь содержится в виде пузырьков и гидратов, в среднем 2,3 мг/кг породы), выделения из месторождений нефти и газа, выделения из угольных месторождений, холодная и горячая дегазация земных недр. Определенный вклад вносят антропогенные процессы выделения метана: пищеварение домашних жвачных животных, рисоводство (деятельность анаэробных метаногенных бактерий), выделения из мест складирования отходов – свалок (деятельность анаэробных метаногенных бактерий), выделения из сточных вод, выбросы при добыче угля, горение биомассы и топлива, выбросы при добыче, переработке, транспортировке, использовании природного газа, выбросы попутного нефтяного газа [1–3].

По другим оценкам [4], ежегодный поток метана составляет 1 000–5 000 млн т. Изотопный состав углерода метана атмосферы близок к изотопному составу углерода метана из эндогенных источников. В составе глубинных газов содержание метана изменяется от 0,1 до 98 %. Метановая дегазация приурочена преимущественно к рифтовым зонам, а также к зонам разломов, узлам пересечения разломов, районам развития кимберлитовых трубок. Максимальные значения фиксируются в грязевых вулканах Альпийско-Гималайского складчатого пояса. В рифтовых зонах содержание метана в газах составляет 20–75 %. Так, В. Л. Сывороткин считает, что существующие оценки эндогенного метана занижены (около 200 млн т в год) и оценивает поток метана в 4 500 млн т. Повышенная эмиссия метана из рек и озер объясняется тем, что практически все реки и часть озер так или иначе связаны с тектоническими нарушениями, т. е. с каналами глубинной дегазации [4].

Таким образом, в качестве гипотезы мы предполагаем, что пространственно-временная структура поля тропосферного метана отражает как поверхностные природные и антропогенные источники, так и глубинные. Отфильтровав поверхностные источники («шум»), мы можем использовать потоки метана как индикатор современной геодинамической активности тектонических структур земной коры. Актуальность изучения метана как индикатора современной геодинамической активности обусловлена тем, что, согласно А. В. Матвееву [5], последняя может оказывать существенное влияние на экологическое состояние окружающей среды. В последнее время для исследования тропосферного метана на региональном и глобальном уровнях стало возможным использовать космическую съемку, в т. ч. с помощью специализированного спутника Sentinel-5P TROPOMI [6; 7].

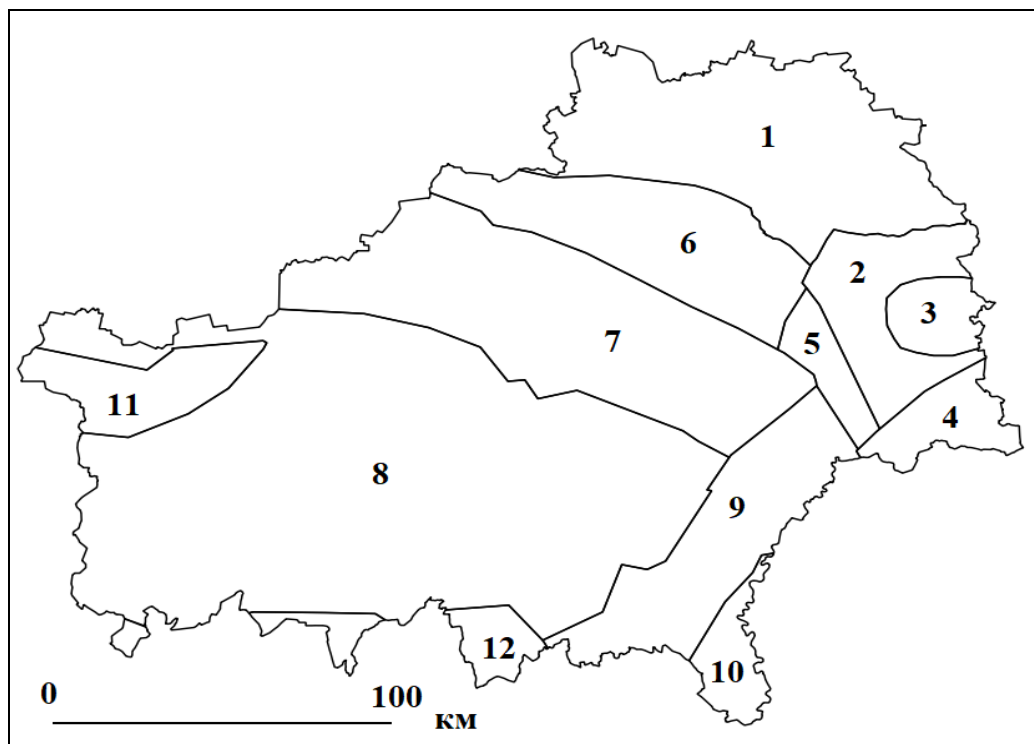
Цель исследования – выяснить связь потоков метана, измеряемых с помощью спутника Sentinel-5P TROPOMI, с тектоническим строением и современной геодинамической активностью.

Задачи исследования:

- 1) обработка и преобразование данных дистанционного зондирования (съемка сенсора TROPOMI спутника Sentinel-5P);
- 2) определение регионального фона метана в тропосфере и его временной динамики;
- 3) изучение пространственно-временной динамики метана в тропосфере над тектоническими структурами юго-востока Беларуси;
- 4) изучение потоков метана узлах космолинементов;
- 5) анализ пространственной связи между содержаниями метана и тектоническими структурами.

Материалы и методика исследований

Район исследований занимает юго-восток Беларуси (в границах Гомельской области). В его пределах находятся такие тектонические структуры, как Припятский прогиб, Воронежская антеклиз, Жлобинская седловина, Брагинско-Лоевская седловина, Украинский щит (рисунок 1).



- 1 – Жлобинская седловина; 2 – Клинцовский грабен Воронежской антеклизы;
 3 – Купревский выступ Воронежской антеклизы;
 4 – Гремячский выступ Воронежской антеклизы; 5 – Гомельская перемычка;
 6 – Северо-Припятское плечо; 7 – Припятский прогиб (северная ступень);
 8 – Припятский прогиб (центральный грабен); 9 – Брагинско-Лоевская седловина;
 10 – Днепровско-Донецкий прогиб; 11 – Микашевичско-Житковичский выступ;
 12 – Украинский щит

Рисунок 1 – Тектонические структуры юго-востока Беларуси

В работе использованы данные космической съемки спутника Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), который определяет атмосферные концентрации (общее содержание в вертикальном столбе тропосферы) озона, метана, формальдегида, угарного газа, диоксида серы, диоксида азота. Измерения ведутся ежедневно с октября 2017 г. Пространственное разрешение $7 \times 5,5$ км.

Данные были преобразованы с помощью модуля Sentinel-5P data explorer для QGIS. Величина случайной ошибки определения метана составляет не более 1%. Продукт содержит значения концентрации сухого метана в толще атмосферы в миллиардных долях от объема (ppb).

Поскольку атмосферные циркуляции на разных высотах рассеивают и перемешивают по горизонтали поток метана, то использовался метод осреднения измерений в заданном временном отрезке, что позволяет сгладить случайные колебания и выделить регулярную составляющую потока метана от земной поверхности. Временные

срезы, на которых определялась усредненная концентрация тропосферного метана: лето 2021 г.; зима 2022 г.; лето 2022 г.; осень 2022 г.; зима 2023 г.

При анализе качества съемки отбраковывались точки, в которых содержание метана было равно нулю (земная поверхность скрыта облаками). Если количество бракованных точек превышало 50 % от их общего количества, то отбраковывался весь снимок. В результате от 45 до 70 % снимков в зависимости от времени года было отбраковано.

С помощью геоинформационной системы QGIS выделялись операционные территориальные единицы (ОТЕ) 3 типов: тектонические структуры земной коры; зоны разломов, представленные на земной поверхности полосами, имеющими ширину 5 км; узлы космолинеаментов (области пересечения 3 и более суперрегиональных, региональных и субрегиональных космолинеаментов). Использованы тектоническая карта Беларуси масштаба 1 : 500000 и космогенная карта Беларуси масштаба 1 : 500000 [8].

Группировка суточных содержаний CH_4 по месяцам и по периодам в пределах ареала соответствующих ОТЕ выполнялась в программе MS Excel, статистическая обработка данных – в MS Excel и STATISTICA. Статистическая обработка содержания метана включала определение среднего, медианного, минимального, максимального значений, стандартного отклонения, среднеквадратичной ошибки, дисперсии.

В качестве потенциальных антропогенных источников метана рассматривались животноводческие комплексы, полигоны твердых коммунальных отходов, предприятия химической и нефтехимической промышленности, железнодорожные узлы, газораспределительные станции магистральных газопроводов; разрабатываемые месторождения нефти.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты изучения регионального фона приведены в таблице 1. Видно, что содержание метана в тропосфере испытывает сезонные колебания: снижается летом и повышается зимой, что соответствует данным по другим регионам мира и объясняется снижением стока метана за счет фотохимических реакций, т. к. поток солнечной радиации летом увеличивается [3]. Так, летом 2021 г. среднее содержание метана составляло 1 824,9 ppb, а зимой 2022 г. оно увеличилось до 1 890,2 ppb, летом 2022 г. снова снизилось до 1 845,4 ppb и т. д. Аналогичные изменения наблюдаются для медианного содержания метана. Стандартное отклонение также зависит от сезона. Зимой этот показатель минимален (2022 г. – 21,8, 2023 г. – 21,2), а летом максимален (2021 г. – 65,5, 2022 г. – 77,8). Наименьший диапазон колебаний отмечен зимой (соответственно 215,2 и 166,7), наибольший – летом и осенью 2022 г. (соответственно 611,8 и 729,6). Максимальные суточные значения составили 2 307,6 (осень 2022 г.) и 2 118,3 (лето 2023 г.).

Таблица 1 – Фоновые содержания метана в тропосфере юго-востока Беларуси, в ppb

Статистика	Период				
	Лето 2021 г.	Зима 2022 г.	Лето 2022 г.	Осень 2022 г.	Зима 2023 г.
Среднее значение	1 824,9	1 890,2	1 845,4	1 887,6	1 891,3
Ошибка среднего значения	1,5	0,4	1,0	0,9	0,5
Медианное значение	1 845,9	1 889,4	1 878,3	1 891,8	1 894,7
Стандартное отклонение	65,5	21,8	77,8	34,1	21,2
Диапазон колебаний	333,1	215,2	611,8	729,6	166,7
Минимальное значение	1 582,2	1 763,6	1 506,5	1 578,0	1 802,3
Максимальное значение	1 915,3	1 978,8	2 118,3	2 307,6	1 969,1

Можно предположить, что различия в концентрациях тропосферного метана над различными тектоническими структурами могут быть обусловлены их современной геодинамической активностью: над геодинамически активными структурами поток метана будет выше. Потоки метана в тропосфере над тектоническими структурами юго-востока Беларуси характеризуются в таблице 2. Видно, что над некоторыми структурами содержание метана превышает региональный фон. Так, летом 2021 г. среднее содержание метана выше регионального фона над Днепровско-Донецким прогибом (на 29,7 ppb), над Гремячским выступом Воронежской антеклизы (на 35,9 ppb), над Купреевским выступом Воронежской антеклизы (на 21,9 ppb), над Клинецовским грабеном и Гомельской перемышкой (соответственно на 14,7 и 14,8 ppb). Минимум – над центральным грабеном Припятского прогиба. Зимой 2022 г. существенных различий между тектоническими структурами по среднему содержанию метана не наблюдается. Превышения над региональным фоном – до 5 ppb. Максимальная концентрация отмечена над Микашевичско-Житковичским выступом, минимальная – над Днепровско-Донецким прогибом.

Летом 2022 г. наибольшие значения характерны для Гремячского выступа Воронежской антеклизы (среднее – 1 859,0, медианное – 1 880,7 ppb), Северо-Припятского плеча (соответственно 1 857,1 и 1 880,1 ppb), Жлобинской седловины (соответственно 1 850,1 и 1 879,8 ppb). Максимальные разовые концентрации (выше 2 000 ppb) наблюдались только над Припятским прогибом: над северной ступенью (31.07.2022 г.) – 2 118,3, над центральным грабеном (14.08.2022 г.) – 2 015,8 ppb. Над Украинским щитом максимальная концентрация тропосферного метана составила 1 978,9, над Брагинско-Лоевской седловиной – 1 970,8, над Клинецовским грабеном Воронежской антеклизы – 1 928,7 ppb.

Таблица 2 – Динамика потоков метана в тектонических структурах юго-востока Беларуси (среднее содержание и его ошибка), в ppb

Тектоническая структура	Период				
	Лето 2021	Зима 2022	Лето 2022	Осень 2022	Зима 2023
Днепровско-Донецкий прогиб	1 854,6 ± 3,8	1 877,9 ± 2,3	1 843,1 ± 5,6	1 896,0 ± 7,1	1 877,8 ± 3,4
Брагинско-Лоевская седловина	1 834,1 ± 3,5	1 885,4 ± 1,1	1 828,6 ± 3,9	1 886,0 ± 2,2	1 883,8 ± 1,8
Украинский щит	1 814,6 ± 7,0	1 886,3 ± 1,6	1 827,1 ± 7,8	1 857,3 ± 6,5	1 894,1 ± 3,2
Микашевичско-Житковичский выступ	1 810,4 ± 12,1	1 896,0 ± 1,7	1 830,5 ± 5,8	1 880,6 ± 5,3	1 896,4 ± 2,3
Гремячский выступ Воронежской антеклизы	1 860,8 ± 3,9	1 893,7 ± 1,9	1 859,0 ± 4,6	1 887,1 ± 3,5	1 889,4 ± 4,2
Клинецовский грабен Воронежской антеклизы	1 839,6 ± 3,9	1 890,7 ± 1,3	1 834,6 ± 4,0	1 895,8 ± 4,3	1 885,2 ± 2,5
Купреевский выступ Воронежской антеклизы	1 846,8 ± 7,1	1 889,0 ± 2,7	1 830,3 ± 6,8	1 887,1 ± 3,5	1 882,8 ± 3,9
Гомельская перемышка	1 839,1 ± 7,2	1 892,8 ± 2,4	1 836,1 ± 6,3	1 897,9 ± 2,9	1 891,4 ± 3,9
Жлобинская седловина	1 824,2 ± 3,7	1 890,9 ± 1,0	1 850,1 ± 2,2	1 883,2 ± 2,0	1 879,8 ± 1,7
Северо-Припятское плечо	1 825,2 ± 5,4	1 892,8 ± 1,3	1 857,1 ± 2,4	1 894,6 ± 1,4	1 886,5 ± 2,2
Припятский прогиб (северная ступень)	1 816,6 ± 3,6	1 892,2 ± 0,8	1 847,2 ± 2,0	1 893,4 ± 1,3	1 890,3 ± 1,0
Припятский прогиб (центральный грабен)	1 807,6 ± 2,6	1 889,4 ± 0,6	1 835,9 ± 1,4	1 886,1 ± 1,5	1 895,9 ± 0,7
Регион	1 824,9 ± 1,5	1 890,2 ± 0,4	1 845,4 ± 1,0	1 887,6 ± 0,9	1 891,3 ± 0,5

Наименьшие концентрации метана приурочены к Украинскому щиту (соответственно 1 827,1 и 1 862,7 ppb), Брагинско-Лоевской седловине (соответственно 1 828,6 и 1 866,8 ppb), Микашевичско-Житковичскому выступу (соответственно 1 830,5 и 1 876,3 ppb).

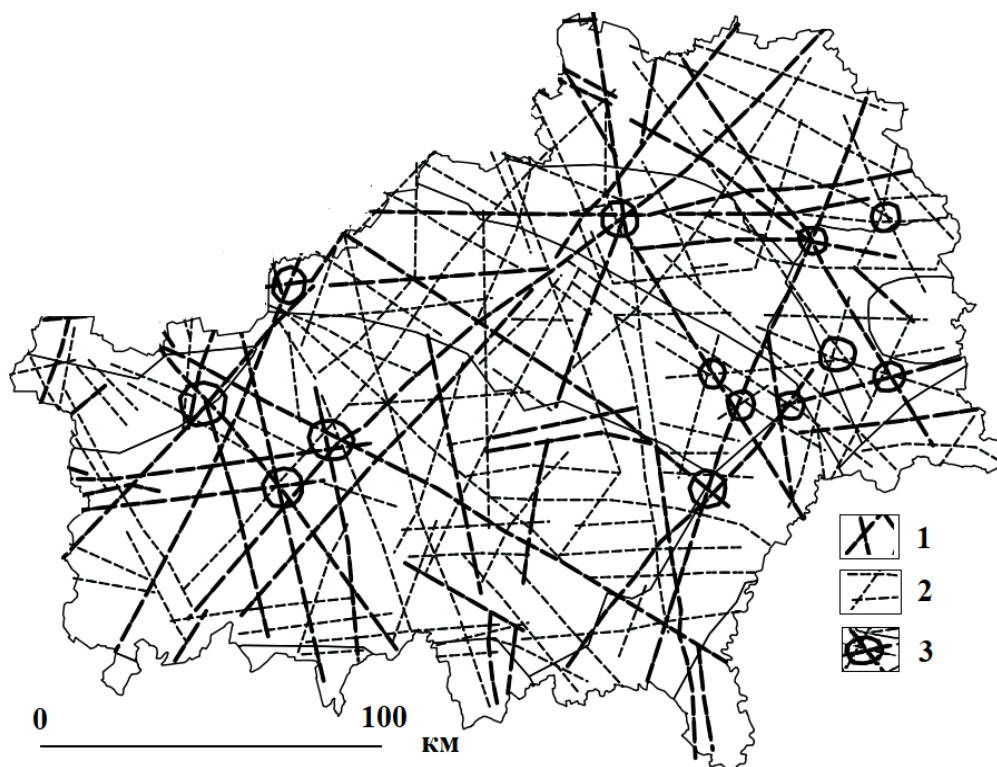
Величина стандартной ошибки среднего содержания метана изменяется от 1,4 (центральный грабен Припятского прогиба) до 7,8 (Украинский щит) ppb. Средняя величина для юго-востока составляет 4,4 ppb. Величина стандартного отклонения колеблется от 57,4 (Гремячский выступ Воронежской антеклизы) до 91,3 (Микашевичско-Житковичский выступ) ppb. Амплитуда колебаний концентрации тропосферного метана составляет от 245 (Гомельская структурная перемычка) до 593,3 (северная ступень Припятского прогиба) ppb. В среднем по тектоническим структурам амплитуда колебаний концентрации метана составила 372,2 ppb.

Было изучено содержание тропосферного метана над зонами тектонических разломов (Северо-Припятский краевой разлом, Лоевский разлом, Южно-Припятский разлом, Жлобинский разлом, Оземлинско-Первомайский разлом). Установлено, что над зонами тектонических разломов усредненная за летний период 2022 г. величина содержания метана в столбе тропосферы составила 1 849,4, а медианное значение – 1 882,0 ppb (отличия от фона статистически недостоверны). Однако над некоторым разломными структурами поток метана проявляется сильнее. Над восточной частью Северо-Припятского краевого разлома (отделяет Припятский прогиб от Северо-Припятского плеча) среднее содержание метана составило 1 857,3, а над западной частью этого же разлома (отделяет прогиб от Белорусской антеклизы) – 1 867,1 ppb. Над Лоевским разломом (отделяет Брагинско-Лоевскую седловину от Припятского прогиба) среднее содержание метана составило 1 867,7, а медианное – 1 884,2 ppb. Над Жлобинским разломом (отделяет Жлобинскую седловину от Северо-Припятского плеча) среднее содержание метана составило 1 856,1, медианное – 1 886,3 ppb. Над Южно-Припятским разломом (отделяет Украинский щит от Припятского прогиба) – соответственно 1 832,9 и 1 875,3 ppb. Таким образом, средние и медианные значения содержания метана в столбе тропосферы в летние периоды в рассмотренных надразломных зонах, как правило, выше фоновых (исключение – Южно-Припятский разлом). Средние содержания метана в этих надразломных зонах превышают фон на 9,7, медианные – на 11,5 ppb. Однако данные отличия также статистически недостоверны.

Таким образом, отличия содержаний метана между разными тектоническими структурами статистически недостоверны, что, вероятно, обусловлено влиянием биогенных и антропогенных источников метана, которые в данной работе не рассматриваются. Можно предположить, что совокупное влияние разных источников маскирует тектонические эффекты в поле концентраций тропосферного метана.

Согласно работам И. С. Копылова современная геодинамическая активность концентрируется в узлах пересечения линеаментов [9–10]. На основе космогенной карты Беларуси [8], нами в регионе выделено 20 узлов космолинеаментов (пересечение трех и более космолинеаментов).

В пределах каждого узла были определены средние концентрации метана по пять временным срезам (сезонам) 2021–2023 гг. В связи со значительной облачностью и небольшой площадью объектов только для 13 узлов (рисунок 2) получилось определить концентрации метана по всем 5 сезонам.



- 1 – суперрегиональныя і рэгіянальныя космолінеаменты;
 2 – субрэгіянальныя і лакальныя космолінеаменты;
 3 – узлы космолінеаментов, в которых изучались потоки метана

Рисунок 2 – Карта-схема космолінеаментов юго-востока Беларуси

Среднее содержание метана над узлами космолінеаментов оказалось выше фоновых значений на протяжении всех 5 временных срезов (рисунок 3). Однако, отличия в зимние периоды статистически недостоверны. Наиболее сильно содержание метана над узлами космолінеаментов отличается от фонового в летние периоды. Если анализировать динамику содержания метана над каждым узлом в отдельности, то можно разделить последние на три группы: 1) узлы, над которыми содержание метана в течение всех 5 временных срезов превышает региональный фон (2 узла); 2) узлы, над которыми содержание метана превышает региональный фон на отдельных временных срезах (9 узлов); 3) узлы, над которыми содержание метана не превышает региональный фон (2 узла).

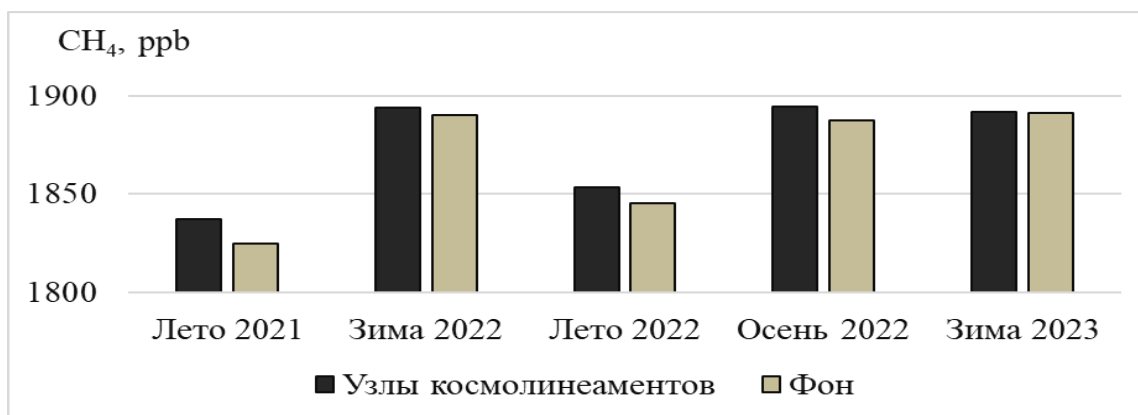


Рисунок 3 – Динамика среднего содержания метана над узлами космолінеаментов в сравнении с региональным фоном

К первой группе относится узел космолинеаментов «Добруш», расположенный в районе города Добруш, населенных пунктов Жгунь и Жгуно-Буда (пересечение 2 региональных и 2 субрегиональных космолинеаментов), который находится в пределах Воронежской антеклизы. Здесь содержание метана превышает фон в течение всего периода наблюдений, вне зависимости от сезона года (рисунок 4). Летом 2021 г. фон превышен на 27,8 ppb, зимой 2022 г. – на 10,5 ppb, летом 2022 г. – 6,2 ppb, осенью 2022 г. – на 9,4 ppb, зимой 2023 г. – на 17,5 ppb. Максимальные содержания составляли по периодам: лето 2021 г. – 1 881,7 (фон превышен на 56,8); зима 2022 г. – 1 925,6 (фон превышен на 35,4); лето 2022 г. – 1 912,3 (фон превышен на 66,9); осень 2022 г. – 1 908,0 (фон превышен на 20,4); зима 2023 г. – 1 926,3 (фон превышен на 35,0) ppb (т. е. максимальные значения содержания метана выходят за пределы стандартного отклонения). При этом возможные антропогенные источники метана на территории данного узла отсутствуют.

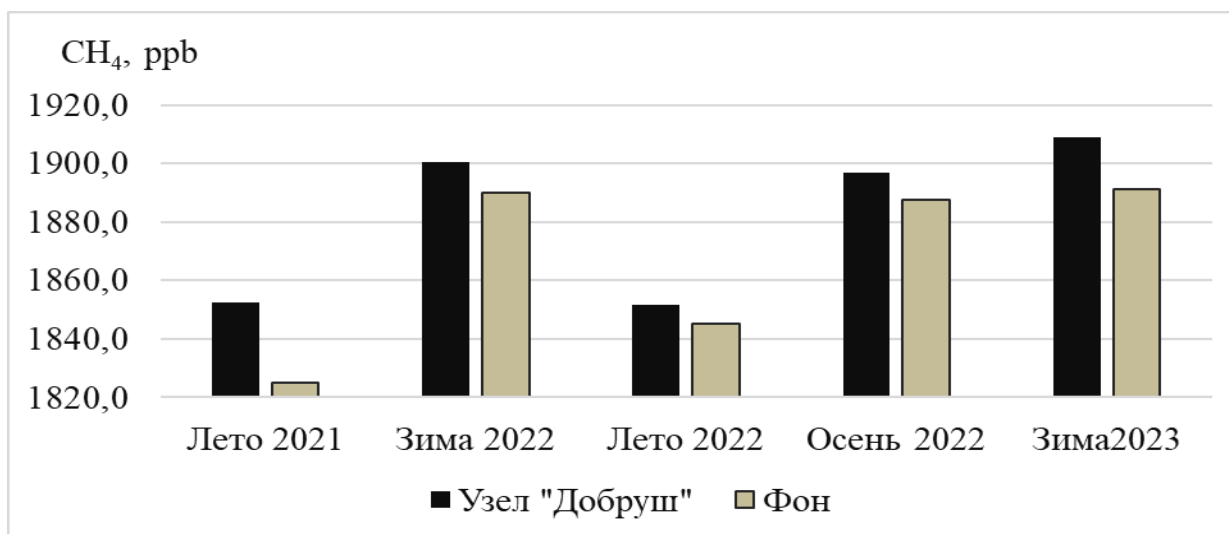


Рисунок 4 – Динамика среднего содержания метана над узлом космолинеаментов «Добруш» в сравнении с региональным фоном

На основе выполненного анализа пространственно-временной динамики потока метана в регионе нами предлагаются следующие признаки оценки геодинимической активности узлов космолинеаментов:

- 1) превышение среднего (медианного) содержания метана в тропосфере фоновых значений вне зависимости от сезона (на 10 и более ppb);
- 2) превышение максимальным содержанием метана фоновое значение в соответствующий сезон (лето, осень, зима) не менее, чем на величину стандартного отклонения ($\max \pm \sigma$);
- 3) отсутствие потенциальных антропогенных источников.

Все три критерия выполняются в случае узла «Добруш».

Узел космолинеаментов «Гомель» (пересечение 4 субрегиональных космолинеаментов, находится в пределах Воронежской антеклизы) характеризуется превышением регионального фона летом 2021 г. – на 21,2 ppb, осенью 2022 г. – на 8,0 ppb и зимой 2023 г. – на 16,0 ppb. Максимальные содержания составляли по периодам: лето 2021 г. – 1 883,5 (фон превышен на 58,6); зима 2022 г. – 1 911,7 (фон превышен на 21,5); лето 2022 г. – 1 926,5 (фон превышен на 81,1); осень 2022 г. – 1 913,0 (фон превышен на 25,4); зима 2023 г. – 1 907,6 (фон превышен на 16,3) ppb. Максимальные значения, также, как и в предыдущем случае, выходят за пределы стандартного отклонения ($> 1\sigma$) в каждом из рассматриваемых временных интервалов. Однако на территории данного

узла, вероятно, могут иметься антропогенные источники выбросов метана (утечки метана на железнодорожных станциях, промышленных и агропромышленных предприятиях, в жилой застройке). Схожая ситуация наблюдается в узлах «Грановка» (пересечение двух региональных и двух субрегиональных космолинеаментов), «Чкалово» (пересечение трех региональных и двух субрегиональных космолинеаментов). В узлах «Светиловичи» (пересечение пяти субрегиональных и локальных космолинеаментов) и «Уборок» (пересечение трех региональных космолинеаментов) содержание метана не превышает региональный фон в течение всего времени наблюдений. Таким образом, рассмотренные узлы космолинеаментов различаются по динамике потоков метана, что может быть проявлением их различий в степени геодинамической активности.

Заклучение

Проведенные исследования показали следующее:

1. Изменения среднего содержания метана имеют сезонный характер (повышение зимой, снижение летом), что обусловлено особенностями стока метана в связи фотохимическими реакциями в атмосфере.

2. Региональный фон составил: летом 2021 г. – $1\,824,9 \pm 1,5$; зимой 2022 г. – $1\,890,2 \pm 0,4$; летом 2022 г. – $1\,845,4 \pm 1,0$; осенью 2022 г. – $1\,887,6 \pm 0,9$; зимой 2023 г. – $1\,891,3 \pm 0,5$ ppb.

3. Летом 2021 г. максимальные потоки метана отмечены над Днепровско-Донецким прогибом, Гремячским выступом Воронежской антеклизы, Купреевским выступом Воронежской антеклизы, Клинцовским грабеном и Гомельской перемычкой; летом 2022 г. – над Гремячским выступом Воронежской антеклизы, Северо-Припятским плечом, Жлобинской седловиной; осенью 2022 г. – над Северо-Припятский плечом, Днепровско-Донецким прогибом, Клинцовским грабеном, Гомельской перемычкой, северной ступенью Припятского прогиба; в зимние периоды отличия по среднему содержанию метана в тропосфере между тектоническими структурами и региональным фоном отсутствуют.

4. Проведено изучение динамики потока метана над узлами космолинеаментов: среднее содержание метана над узлами космолинеаментов оказалось выше фоновых значений на протяжении всех пяти временных срезов.

5. Разработаны критерии оценки геодинамической активности узлов космолинеаментов по потокам метана: 1) превышение среднего (медианного) содержания метана в тропосфере фоновых значений вне зависимости от сезона (на 10 и более ppb); 2) превышение максимальным содержанием метана фонового значения в соответствующий сезон (лето, осень, зима) не менее, чем на величину стандартного отклонения ($\max \pm \sigma$); 3) отсутствие потенциальных антропогенных источников.

6. Выполнена оценка геодинамической активности узлов космолинеаментов юго-востока Беларуси, согласно которой высокая геодинамическая активность характерна для узла «Добруш» (Клинцовский грабен Воронежской антеклизы).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты / под ред. В. Г. Бондура, И. И. Мохова, А. А. Макоско. – М. : РАН, 2022. – 388 с.

2. Киселев, А. А. С метаном по жизни / А. А. Киселев, И. Л. Кароль. – СПб. : Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова, 2019. – 73 с.

3. Семенов, С. М. Роль метана в современном изменении климата / С. М. Семенов, И. Л. Говор, Н. Е. Уварова. – М. : НИИПЭ, 2018. – 106 с.

4. Сывороткин, В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы / В. Л. Сывороткин. – М. : Геоинформцентр, 2002. – 250 с.
5. Матвеев, А. В. Классификация природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 98–106.
6. Черепанова, Е. В. Анализ по космическим данным TROPOMI аномалий концентраций метана над выгоревшими в 2018–2019 гг. территориями бореально-арктической зоны Восточной Сибири / Е. В. Черепанова, Н. В. Феоктистова, М. А. Чудакова // Исслед. Земли из космоса. – 2020. – № 5. – С. 63–77.
7. Мониторинг изменений концентрации метана в атмосфере Арктики в 2019–2021 гг. по данным спектрометра TROPOMI / В. И. Богоявленский [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 304–319.
8. Космотектоническая карта Беларуси масштаба [Карта] : 1 : 50 0000 / Р. Г. Горещкий [и др.] // Літасфера. – 2013. – № 1 (38). – С. 3–29.
9. Копылов, И. С. Линеаментно-блоковое строение и геодинамические активные зоны Среднего Урала / И. С. Копылов // Вестн. Перм. ун-та. Геология. – 2011. – Вып. 3 (12). – С. 18–32.
10. Копылов, И. С. Геодинамические активные зоны Приуралья, их проявления в геофизических, геохимических, гидрогеологических полях / И. С. Копылов // Успехи соврем. естествознания. – 2014. – № 4. – С. 69–74.

REFERENCES

1. Mietan i klimatichieskije izmienenija: nauchnyje problemi i tiekhnologichieskije aspiekty / pod ried. V. G. Bondura, I. I. Mokhova, A. A. Makosko. – М. : RAN, 2022. – 388 s.
2. Kisieliiov, A. A. S mietanom po zhizni / A. A. Kisieliiov, I. L. Karol'. – SPb. : Gl. gieofizich. obsiervatorija im. A. I. Vozejkova, 2019. – 73 s.
3. Siemionov, S. M. Rol' mietana v sovriemennom izmenenii klimata / S. M. Siemionov, I. L. Govor, N. Ye. Uvarova. М. : NIPE, 2018. – 106 s.
4. Syvorotkin, V. L. Glubinnaja diegazacija Ziemli i global'nyje katastrofy / V. L. Syvorotkin. – М. : Geoinformcentr, 2002. – 250 s.
5. Matviejev, A. V. Klassifikacija prirodnykh i prirodno-antropogiennykh opasnostiej litosfiernogo klassa na tierritorii Bielarusi / A. V. Matviejev // Litasfiera. – 2017. – №1 (46). – S. 98–106.
6. Chieriepanova, Ye. V. Analiz po kosmichieskim dannym TROPOMI anomalij koncentracij mietana nad vygorievshimi v 2018–2019 gg. tierritorijami borieal'no-arktichieskoj zony Vostochnoj Sibiri / Ye. V. Chieriepanova, N. V. Fieoktistova, M. A. Chudakova // Isslied. Ziemli iz kosmosa. – 2020. – № 5. – S. 63–77.
7. Bogojavlenskij, V. I. Monitoring izmienenij koncentracii mietana v atmosferie Arktiki v 2019–2021 gg. po dannym spiektrometra TROPOMI / V. I. Bogojavlenskij, O. S. Sizov, R. A. Nikonov, I. V. Bogojavlenskij // Arktika: ekologiya i ekonomika. – 2022. – Т. 12, № 3. – S. 304–319.
8. Kosmotiektonichieskaja karta Bielarusi [Karta] : 1 : 50 0000 / R. G. Goreckiy [i dr.] // Litasfiera. – 2013. – № 1 (38). – S. 3–29.
9. Kopylov, I. S. Linieamientno-blokoivoje strojenije i gieodinamichieskije aktivnyje zony Sriedniego Urala / I. S. Kopylov // Viestn. Pierm. un-ta. Gieologija. – 2011. – Vyp. 3 (12). – S. 18–32.
10. Kopylov, I. S. Gieodinamichieskije aktivnyje zony Priural'ja, ikh projavlienija v gieofizichieskikh, gieokhimichieskikh, gidrogieologichieskikh poliakh / I. S. Kopylov // Uspiekhii sovriem. jestiestvoznaniya. – 2014. – № 4. – S. 69–74.

УДК [911.2:551.8] (476.1)

Георгий Иванович Литвинюк

канд. геол.-минерал. наук, доц., доц. каф. региональной геологии
Белорусского государственного университета

Georgiy Litvinyuk

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Regional Geology of Belarusian State University
e-mail: litvinhi@bsu.by

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ И СЕМЕННОЙ ФЛОРЕ РАЗРЕЗА ОСТРОВЕЦ

Приводятся результаты палеокарпологического изучения нового разреза муравинских межледниковых отложений в окрестностях г. Островец на северо-западе Беларуси. По результатам изучения установлен возраст вмещающих отложений, анализируется состав ископаемой флоры оптимума (фаза граба) и конца муравинского межледниковья, выявлены особенности, установлены условия ее формирования на основании анализа руководящих видов, а также проведены палеоклиматические реконструкции и определены температурные параметры муравинского межледниковья для северо-запада Беларуси.

Ключевые слова: палеогеография, палеоклимат, ископаемая флора, сожское оледенение, муравинское межледниковье.

New Data on The Geological Structure and Seed Flora of The Ostrovets Section

The article presents the results of a paleocarpological study of a new section of the Muravinsky interglacial deposits in the vicinity of the town of Ostrovets in the north-west of Belarus. Based on the results of the study, the age of the enclosing deposits was determined. The composition of the fossil flora of the Muravinsky interglacial optimum corresponding to the hornbeam phase is analyzed. Peculiarities of flora development are revealed, the conditions of its formation are established on the basis of the analysis of leading species. Paleoclimatic reconstructions have been carried out and the temperature parameters of the Muravinsky interglacial for the north-west of Belarus have been determined.

Key words: paleogeography, paleoclimat, fossil flora, sozh glaciations, murawinski interglacial period.

Введение

Муравинские отложения являются одним из важнейших маркирующих горизонтов в толще плейстоценовых отложений как Беларуси, так и всей древнеледниковой области Европы [1; 2]. Выяснение условий их залегания и стратиграфическое положение по отношению с пограничными горизонтами, а также изучение истории развития флоры и фауны позволяют решать многие вопросы палеогеографии и проводить широкие палеогеографические реконструкции, которые позволят спрогнозировать изменение климата в будущем [3]. Большое значение для решения данных вопросов имеет изучение отложений палеоводоемов муравинского возраста. В масштабах геологического времени озерные котловины довольно быстро заполняются различными генетическими типами осадков с органогенными остатками разнообразных животных и растений. Часть органики в виде листьев, коры деревьев, остатков травы, древесины приносится реками, ручьями и ветром. В прибрежной зоне развивается водная растительность, которая дает автохтонные отложения. Поэтому наиболее важны с точки зрения чистоты отложений палеоводоемы, расположенные на водоразделах и не связанные с речными долинами. Погребенные старицы, конечно, имеют более богатый и разнообразный набор видов как водных, так и наземных растений, т. к. часть органики все-таки заносится в старицы водами и в конечном счете захоранивается, хотя перенос осуществляется и не на очень большие расстояния. Водораздельные водоемы хотя и имеют менее богатый и разнообразный видовой состав, но это сугубо небольшая территория, окружающая водоем и прилегающие к нему части. Поэтому отложения таких разрезов,

как Белый ров, Заславль, Тимошковици, Пышки и вновь обнаруженный Островец, отражают растительность непосредственно свою, сугубо водную, и окружающей его территории [4–7].

Палеокарпологический метод, который применяется для определения возраста гумусированных отложений, выявления состава ископаемой флоры (древесных и кустарниковых пород, а также водных, болотных и прибрежно-водных видов растений), дает возможность на основании полученного материала проводить палеогеографические реконструкции и является одним из наиболее широко применяемых методов в четвертичной геологии.

Материалы и методика исследования

Летом 2020 г. геологами Слуцкой экспедиции были обнаружены выходы межледниковых отложений в песчано-гравийном карьере в окрестностях г. Островец. Авторы посетили данное обнажение летом 2020 г., сделали предварительное описание отложений и отобрали образцы на палеокарпологический анализ [8]. Полученные предварительные данные показали важность данного разреза для проведения палеогеографических реконструкций и выяснения условий развития растительности. Поэтому летом 2021 г. было проведено повторное изучение органогенных отложений. С этой целью была заложена новая расчистка в 10 м на юг от первой, отобрали образцы на палинологический анализ, произведено подробное описание разреза, изучено его геологическое строение и выполнено детальное исследование органогенных отложений.

В западной стенке карьера обнажается небольшая по мощности и протяженности линза межледниковых отложений, представленная торфами и торфянистыми супесями. Протяженность линзы составляет около 120 м, а межледникового торфяника всего 30 м, мощность гумусированных отложений варьирует от нескольких сантиметров на выклинивании до 0,6–0,7 м в центре (рисунки 1–6).

Межледниковые отложения как непосредственно в разрезе, так и в соседних стенках карьера не перекрываются мореной, т. к. находятся южнее границы распространения последнего поозерского ледника (рисунки 3, 6). Карьер расположен на большом плоском холме, имеет овальную или почти округлую форму, диаметром 500–600 м и глубину около 13–15 м (рисунок 1). Поверхность местности над линзой органогенных осадков ровная, без каких-либо явно выраженных понижений или депрессий. Расчистка, заложённая в центральной части линзы, вскрыла следующие отложения (сверху вниз, в метрах) (таблица 1):

Таблица 1

		Мощность, м
1.	Почва	0,55–0,60
2.	Песок ржаво-бурый, мелко-тонкозернистый, пылеватый, однородный, пронизан корнями современных растений. Нижний контакт четкий, ровный.	0,80
3.	Песчано-гравийно-галечный горизонт с отдельными валунами кристаллических пород.	0,74
4.	Суглинок серый, светло-серый, грубый, с гравием и единичной галькой, однородный, неслоистый. Нижний контакт четкий, ровный.	0,30
5.	Супесь темно-коричневая, торфянистая, горизонтально слоистая, постепенно переходящая в нижележащий торф. Нижний контакт неясный.	0,36–0,40
6.	Торф темно-коричневый, плотный, листоватый, в верхней части травяной, осоково-гипновый, в нижней – с остатками крупной древесины (ветки, сучья, обломки стволов деревьев (рисунок 5). Нижний контакт четкий, ровный.	0,40
7.	Супесь светло-серая, с коричневатым оттенком, тонкая, с мелким гравием и включениями мелкой органики. Нижний контакт четкий, волнообразный.	0,23

Окончание таблицы 1

8.	Суглинок зеленовато-серый, грубый, с включениями мелкого гравия, единичной гальки и прослойками органики в верхней части слоя, а в нижней – с прослойками суглинка серого. Слой разделен прослоем ожелезнения мощностью 5–7 см с включениями отдельных окатанных валунов диаметром до 35 см. Нижний контакт четкий, неровный.	0,30–0,38
9.	Песок грязно-серый, зеленовато-серый, грубый, с гравием, галькой и небольшими валунами преимущественно кристаллических пород, неслоистый, не отсортированный. Нижний контакт четкий, ровный, подчеркнут ожелезнением, мощностью 0,5–1 см.	0,28
10.	Переслаивание суглинка зеленовато-серого и песков грязно-серых с включениями единичной мелкой гальки. Нижний контакт четкий, падает на север под углом 30 градусов.	0,30
11.	Суглинок зеленовато-серый, плотный, грубый, с включением гальки и валунов кристаллических пород. Нижний контакт четкий, ровный.	0,35
12.	Песок желтый, тонкозернистый, однородный, неясно горизонтально слоистый. Нижний контакт четкий, ровный.	0,05
13.	Суглинок голубовато-серый, тонкий, горизонтально слоистый. Нижний контакт четкий, ровный.	0,03
14.	Песок светло-серый, белесоватый, тонкий. Нижний контакт четкий, ровный.	0,10
15.	Песчано-гравийная смесь с галькой, валунами и линзочками суглинка голубовато-серого.	0,50
16.	Песок белесовато-серый, крупнозернистый, неясно горизонтально слоистый, местами ожелезненный.	0,55
17.	Песчано-гравийная смесь с линзочками суглинка голубоватого перемятого.	0,40
18.	Песок белесовато-серый, тонкомелкозернистый, местами ожелезненный, горизонтально слоистый.	Вскрыто 0,80



Рисунок 1 – Общий вид карьера у г. Островца



Рисунок 2 – Выходы линзы межледниковых отложений



**Рисунок 3 – Межледниковые отложения,
вскрытые расчисткой в центральной части линзы**



Рисунок 4 – Торф травяной в верхней части и с древесиной в нижней



Рисунок 5 – Ископаемая древесина из нижней части торфа



Рисунок 6 – Песчано-гравийные отложения карьера за пределами линзы

Из слоев 5–6 на палеокарпологический анализ было отобрано четыре образца породы объемом по два полных ведра каждый. После длительной обработки в камеральных условиях была выявлена не слишком богатая, но очень выразительная семенная флора, насчитывающая 44 вида древесных, кустарниковых и травянистых растений, отражающая конечные фазы развития растительности в муравинском межледниковье (таблица 2).

Таблица 2 – Состав семенной флоры разреза Островец

Номера образцов	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Растение				
<i>Chara</i> sp.		2		1
<i>Selaginella selaginoides</i> (L.) Link			2	27
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	ом	ом	мн	мн
<i>Pinus sylvestris</i> L.	ом	ом	ом	мн
<i>Pinus</i> sp.	33	мн	1	
<i>Juniperus communis</i> L.	3		12	3
<i>J. cf. sabin</i> a L.		1		
<i>Typha</i> sp.	1			
<i>Sparganium cf. hyperboreum</i> Laest.	38	2	79	55
<i>Potamogeton natans</i> L.			8	ом
<i>Potamogeton</i> sp.	3	1		
<i>Scheuchzeria palustris</i> L.	мн	61	58	14
<i>Alisma plantago-aquatica</i> L.	16			
<i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	1			
<i>Carex</i> s/gen <i>Carex</i>	ом	ом	ом	ом

Окончание таблицы 2

Carex s/gen Vigne	ом	ом	ом	ом
Calla palustris L.	69			
Iris pseudacorus L.	8			
Betula alba L.	ом	ом	ом	мн
B. humilis Schrank			9	9
Carpinus betulus L.	ом	1		
Corylus sp.	1			
Urtica dioica L.	2			
Urtica sp.	17			
Rumex acetosella L.			4	
Rumex sp.	1			
Ranunculus repens L.	мн		3	
R. sceleratus L.		1		
R. reptans L.				4
Rubus idaeus L.	83			
R. caesius L.	1			
Fragaria vesca L.	1		4	6
Comarum palustre L.		75		
Potentilla sp.			8	5
Tilia cf. tomentosa Moench	+			
Hypericum sp.			1	1
Viola sp.	4			
Empetrum nigrum L.		5	55	9
Andromeda polyfolia L.	1	ом	26	14
Viburnum opulus L.				1
Arctostaphylos uva-ursi (L.) Spreng.		1	8	5
Menyanthes trifoliata L.	ом	ом	ом	98
Ajuga reptans L.	1			
Lycopus europaeus L.	мн			

Примечание – ом – очень много остатков (более 200), мн – много (более 100), + – единичные обломки семян.

Основу флоры составляют древесные хвойные породы (*Pinus* и *Picea*), представленные огромным количеством остатков хвои, семян и шишек. Следует отметить, что в нижней части разреза (образец 1) преобладают остатки ели, а сосна выступает в качестве второстепенного элемента в растительных сообществах, а выше по разрезу (образец 2) господствующее положение переходит к сосне, ель выступает в качестве примеси, хотя все равно представлена огромным количеством остатков. Помимо большого количества хвои и семян обычной *Pinus sylvestris*, определенной по шишкам хорошей сохранности, в незначительном количестве встречается хвоя какого-то другого вида из семейства *Pinaceae*. Пучки хвои этой сосны отличаются от обычной *Pinus sylvestris*, своей формой и цветом, основание пучка менее выражено, а сама хвоя более широкая и в основном светло-коричневого цвета.

Помимо большого количества хвои и семян ели, была найдена одна практически целая шишка *Picea abies*, определение которой не вызывает сомнения. Находка шишки данного вида ели свидетельствует о том, что в муравинском межледниковье произростала ель обыкновенная, которая пришла на смену ели сибирской, господствующей в лоевском интерстадиале. Из других древесных пород следует отметить большое количество плодов *Carpinus betulus*, что говорит о его значительной доле участия в растительных сообществах. Также встречается большое (но не массовое) количество ореш-

ков *Betula alba* и были выявлены единичные фрагменты орехов *Corylus* sp., предположительно *Corylus avellana*, а также обломки плодов *Tilia* sp. Данный набор видов древесных пород характерен для конечных фаз муравинского межледниковья.

Травянистая растительность выглядит значительно беднее в видовом отношении. Она представлена видами умеренных условий местообитания, такими как *Scheuchzeria palustris*, *Ranunculus repens*, *Rubus idaeus*, *Menyanthes trifoliata*, *Lycopus europaeus*. Обращает на себя внимание массовое количество остатков осок двух видов – наземной и водной форм обитания. Остальные виды представлены единичными или немногочисленными экземплярами растений болотных условий местообитания. Удивительным фактом является также полное отсутствие видов бразениевого комплекса, хотя они вполне могли здесь присутствовать, нет даже таких видов умеренных условий местообитания как *Nuphar*, *Nymphaea*, *Najas*, *Ceratophyllum* и др.

Флора верхней части разреза (образцы 3–4) имеет совершенно другой облик. Здесь состав флоры заметно меняется, исчезают все широколиственные формы, уменьшается роль хвойных и мелколиственных пород. Появляются первые признаки похолодания климата – это орешки и крылатки *Betula humilis* и мегаспоры *Selaginella selaginoides*, представленные незначительным количеством остатков. В целом разнообразие флоры уменьшается практически в два раза, происходит резкое обеднение ее состава. Помимо исчезновения всех теплолюбивых форм и многих видов умеренных условий местообитания, появляются и такие виды как *Ranunculus reptans*, *Rumex acetosella*, *Potentilla* sp., *Empetrum nigrum*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Potamogeton natans*, свидетельствующие о существовании более прохладного климата. Многие семена выглядят явно недозрелыми, а другие имеют значительно меньшие размеры, чем в межледниковых отложениях.

В сравнении с другими муравинскими межледниковыми флорами Беларуси, полученными из оптимальных фаз, флора Островца выглядит заметно беднее. Она воспроизводит совершенно особый тип растительности, отличный от муравинских межледниковых флор Беларуси, в которой доминирующее положение занимают темнохвойные породы (*Pinus*, *Picea*), а широколиственные (*Carpinus*, *Tilia*, *Corylus*) играют вспомогательную роль. Относительная бедность состава данной флоры не умаляет ее значения, т. к. она происходит из северо-западной части Беларуси, где нет ни одного разреза с межледниковыми органогенными отложениями. Выявленная флора воспроизводит особый хвойный тип растительности, что совсем не характерно для конца оптимума (фаза граба) муравинского межледниковья. По составу выявленных форм и типу воспроизводимой растительности полученная флора может быть вполне сопоставима с флорой разреза Заславль, одновозрастной которой и является [4; 5]. Проведенные палеоклиматические исследования на основании изучения ископаемых плодов и семян позволили установить, что средние температуры июля для данной местности колебались в пределах от +17,2 °C до +20,5 °C, а января – от +0,2–0,3 °C до –7,2–7,3 °C. (рисунок 7). В настоящее время средняя температура июля для данной территории составляет +17,5 °C, а января колеблется от –6,5 °C до –7,0 °C. В муравинском межледниковье в районе Островца температуры июля были, чуть выше современных на 1,0–1,5 °C, а зимы были значительно мягче и теплее на 3,0–3,5 °C. Наиболее близкие климатические показатели наблюдаются в разрезах Уручье и Заславль на Минской возвышенности [5]. В этих разрезах средние температуры июля практически не отличаются от установленных в Островце, а средняя температура января была чуть ниже, чем на Минской возвышенности, что вполне оправдано в связи с северо-западным расположением разреза. Все это свидетельствует о том, что климат на территории Беларуси в муравинском межледниковье был более теплым, мягким и менее контрастным.

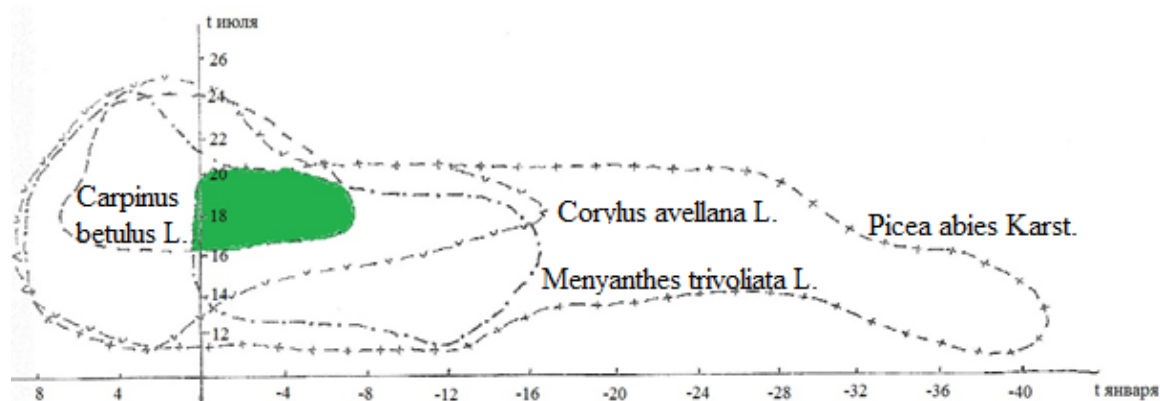


Рисунок 7 – Реконструкция палеотемпературных показателей для оптимума муравинского межледникового разреза Островец

Заклучение

В результате проведенных исследований и анализа состава семенных комплексов разреза Островец было установлено, что на северо-западе Беларуси в оптимуме муравинского межледникового существовали растительные сообщества, в которых господствовали темнохвойные породы деревьев (*Picea*, *Pinus*), а в качестве примеси к ним произрастали граб, липа, орешник, представленные единичными остатками плодов и семян (кроме граба, плоды которого присутствуют в большом количестве (более 600 плодов)). Из травянистой растительности в межледниковом водоеме встречаются виды умеренных условий обитания, такие как *Ranunculus*, *Menyanthes*, *Scheuchzeria* и др. Поражает огромное количество остатков *Carex*, как водных, так и наземных условий обитания, что свидетельствует о не совсем оптимальных условиях. Также следует отметить полное отсутствие хоть каких-либо видов бразениевого комплекса, подтверждающих межледниковых тип флоры. Выполненные палеоклиматические реконструкции на основании выявленного состава флоры дали следующие значения: температура самого теплого месяца (июля) составила $+17,2 - +20,5$ °С, а самого холодного (января) колебалась от $+0,2 - 0,3$ °С до $-7,2 - 7,3$ °С, что в целом вполне сопоставимо с данными, полученными по Минской возвышенности разными авторами, учитывая более северное расположение данного разреза [5; 9; 10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Величкевич, Ф. Ю. Плейстоценовые флоры ледниковых областей Восточно-Европейской равнины / Ф. Ю. Величкевич. – Минск : Наука и техника, 1982. – 239 с.
2. Дорофеев, П. И. Новые данные о плейстоценовых флорах Белоруссии и Смоленской области / П. И. Дорофеев // Материалы по истории флоры и растительности СССР. – М ; Л. : Изд-во АН СССР, 1963. – Вып. 4. – С. 5–180.
3. Изменение климата: последствия, смягчение, адаптация : учеб.-метод. комплекс / М. Ю. Бобрик [и др.]. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2015. – 424 с.
4. Новые данные о семенной флоре геологического памятника природы Заславль / Г. И. Литвинюк [и др.] // Вес. БДПУ. Сер. 3. – 2017. – № 1. – С. 68–71.
5. Литвинюк, Г. И. Палеокарпологические и палеоклиматические исследования межледниковых флор Минской возвышенности / Г. И. Литвинюк, Е. Е. Желток, К. С. Лабынцева // Вес. БГПУ. Сер. 3. – 2018. – № 3. – С. 56–61.

6. Литвинюк, Г. И. Палекарпологические и палеоклиматические исследования муравинских межледниковых флор Белорусской гряды / Г. И. Литвинюк // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. – 2020. – № 2. – С. 70–77.

7. Литвинюк, Г. И. Некоторые итоги изучения межледниковых отложений в разрезе Белый Ров на Оршанской возвышенности / Г. И. Литвинюк, А. Л. Стельмах, А. И. Косяк // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы I Междунар. науч. конф., Минск, 10–12 апр. 2019 г. / редкол.: О. В. Лукашев (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2020. – С. 265–268.

8. Литвинюк, Г. И. Новый разрез межледниковых отложений на северо-западе Беларуси / Г. И. Литвинюк, К. А. Мазурина // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы II Междунар. науч. конф., Минск, 16 февр. 2021 г. ; редкол.: О. В. Лукашев (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021. – С. 144–145.

9. Рылова, Т. Б. Растительность и климат межледниковых интервалов плейстоцена Беларуси по данным палинологических исследований / Т. Б. Рылова, И. Е. Савченко // Літасфера. – 2006. – № 1 (24). – С. 12–26.

10. Рылова, Т. Б. Растительность и климат территории Беларуси и Польши в позднеприпятское (поздняя одра), муравинское (эем) и раннепоозерское (ранний вистулиан) время / Т. Б. Рылова, И. Е. Савченко // Літасфера. – 2013. – № 2 (39). – С. 3–23.

REFERENCES

1. Vielichkievich, F. Yu. Pleistocenovyje flory liednikovykh oblastiej Vostochno-Jevropiejskoj ravniny / F. Yu. Vielichkievich. – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1982. – 239 s.

2. Dorofiejev, P. I. Novyje dannyje o pliejstocenovykh florakh Bielorusсии i Smolien-skoj oblasti / P. I. Dorofiejev // Matierialy po istorii flory i rastitel'nosti SSSR. – M. ; L. : Izd-vo AN SSSR, 1963. – Vyp. 4. – S. 5–180.

3. Izmienienije klimata: posliedstvija, smiagchienenije, adaptacija : uchieb.-mietod. kompleks / M. Yu. Bobrik [i dr.]. – Vitiebsk : VGU im. P. M. Masherov, 2015. – 424 s.

4. Novyje dannyje o sovriemiennoj florie gieologichieskogo pamiatnika prirody Zaslavl' / G. I. Litviniuk [i dr.] // Vies. BDPU. Sier. 3. – 2017. – № 1. – S. 68–71.

5. Litviniuk, G. I. Palieokarpologichieskije i palieoklimatichieskije issliedovanija miezhliednikovykh flor Minskoj oblasti / G. I. Litviniuk, Ye. Ye. Zheltok, K. S. Labynceva // Vies. BGPU. Sier. 3. – 2018. – № 3. – S. 56–61.

6. Litviniuk, G. I. Palieokarpologichieskije i palieoklimatichieskije issliedovanija muravinskikh miezhliednikovykh flor Bieloruskoj griady / G. I. Litviniuk // Zhurn. Belorus. gos. un-ta. Geografija. Gieologija. – 2020. – № 2. – S. 70–77.

7. Litviniuk, G. I. Niekotoryje itogi izuchienija miezhliednikovykh otlozhenij v razriezie Bielyj Rov na Orshanskoj vozvyshehnosti / G. I. Litviniuk, A. L. Stel'makh, A. I. Kosiak // Problemy riegional'noj gieologii zapada Vostochno-Jevropiejskoj platformy i smiezhykh tierritorij : matierialy I Miezhdunar. nauch. konf., Minsk, 10–12 apr. 2019 g. / riedkol.: O. V. Lukashev (gl. ried.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2020. – S. 265–268.

8. Litviniuk, G. I. Novyj razriez miezhliednikovykh otlozhenij na sieviero-zapadie Bielarusi / G. I. Litviniuk, K. A. Mazurina // Problemy riegional'noj gieologii zapada Vostochno-Jevropiejskoj platformy i smiezhykh tierritorij : matierialy II Miezhdunar. nauch. konf., Minsk, 16 feivr. 2021 g. ; riedkol.: O. V. Lukashev (gl. ried.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2021. – S. 144–145.

9. Rylova, T. B. Rastitel'nost' i klimat miezhlednikovykh intervalov pliejstocena Bielarusi po dannym palinologichieskikh issliedovanij / T. B. Rylova, I. Ye. Savchienko // Litasfiera. – 2006. – № 1 (24). – S. 12–26.

10. Rylova, T. B. Rastitel'nost' i klimat tierritorii Bielarusi i Pol'shi v pozdniepripiatskoje (pozdniaja orda), muravinskoje (ejem) i ranniepooziorskoje (rannij vistulian) vriemia // Litasfiera. – 2013. – № 2 (39). – S. 3–23.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 21.04.2023

УДК 504.05

**Николай Васильевич Михальчук¹, Полина Владимировна Качанович²,
Максим Игоревич Хващевский³, Анна Михайловна Подлужная⁴**

¹канд. биол. наук, доц., директор Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси

^{2, 3, 4}мл. науч. сотрудник лаборатории биогеохимии

Полесского аграрно-экологического института Национальной академии наук Беларуси

**Mikalay Mikhalchuk¹, Polina Kachanovich²,
Maksim Khvashcheuski³, Hanna Padluzhnaya⁴**

¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,

Director of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus

^{2, 3, 4}Junior Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry

of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus

[e-mail: tyres810@gmail.com](mailto:tyres810@gmail.com)

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ИМПАКТНЫХ ЗОН НЕКОТОРЫХ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ*

Представлены данные о содержании тяжелых металлов и микроэлементов (Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, Ni, Co, Cr, Mo, As) в лесных подстилках и верхних слоях почв в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов городов Пинска, Кобрина, Бреста, Баранович, Березы и Лунинца. В большинстве случаев содержание исследованных элементов укладывается в нормы ПДК, однако зафиксированы отдельные превышения опасных токсикантов в подстилках, а также в некоторых пробах почв импактных зон полигонов ТКО; при этом почвы отличаются никель-хромовой специализацией. В зоне влияния полигона ТКО г. Барановичи установлено формирование техногеохимической аномалии мышьяка. В ближнем к полигону ТКО г. Березы радиусе (северный сектор) выявлена контрастная никель-ванадиевая геохимическая аномалия. Наиболее высокий суммарный индекс загрязнения почв характерен для зон воздействия полигонов ТКО городов Лунинец и Береза.

Ключевые слова: полигоны твердых коммунальных отходов, тяжелые металлы, почвы, подстилки, загрязнение.

The Content of Heavy Metals in the Soils of Impact Zones of Some Landfills of the Brest Region

Maintenance Data of heavy metals and trace elements (Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, Ni, Co, Cr, Mo, As) in forest litter and soil upper layers in the influence zones of Pinsk, Kobrin, Brest, Baranovichi, Bereza and Luninets MSW landfills are presented in the article. In most cases, the elements maintenance doesn't exceed maximum permissible concentrations. But the excess of dangerous toxicants was recorded in some samples of forest litter near landfills and soils of impact zones of landfills. The soils of the landfills in the south-west of Belarus are characterized of increasing nickel and chromium content compared with the background territories. The contrasting nickel-vanadium geochemical anomaly was identified in the near radius of the Bereza MSW landfill (northern sector). The highest total index of soil pollution is typical for the zones affected by the Luninets and Bereza MSW landfills.

Key words: municipal solid waste landfills, heavy metals, soils, forest litter.

Введение

В настоящее время основным и наименее затратным путем утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является их захоронение на специально отведенных и оборудованных полигонах [1]. В Республике Беларусь в 2018 г. на таких полигонах размещено 22,5 млн м³ ТКО, или около 3,1 млн т, а также 0,8 млн т отходов производства, не относящихся к коммунальным.

*Работа выполнена в рамках конкурса БРФФИ-Брест 2022 (проект Х22Б-010, № госрегистрации 20220931) «Оценка состояния окружающей среды в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов с определением их эксплуатационных возможностей и разработкой мероприятий по оптимизации экологической ситуации».

В Республике Беларусь хорошо разработана нормативно-правовая база в сфере обращения с отходами, основу которой составляют: Закон Республики Беларусь «Об обращении с отходами» от 20.07.2007 г. № 271-3, Национальная стратегия по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 г. (утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28.07.2017 г. № 567), Концепция создания объектов по сортировке и использованию твердых коммунальных отходов и полигонов для их захоронения (утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.10.2019 г. № 715) (далее – Концепция). Согласно указанным документам, основной целью осуществляемых мероприятий по обращению с ТКО является их экологически безопасное захоронение с минимизацией отрицательного воздействия на окружающую среду (поверхностные и подземные воды, почвы, атмосферный воздух, растительность) и исключение риска здоровью населения.

В соответствии с Концепцией в Брестской области вместо 27 ныне эксплуатируемых полигонов к 2030 г. будет создано шесть укрупненных региональных объектов: из них четыре – в период до 2025 г. и два – к 2030 г.

Несмотря на обустройство защитных сооружений, прежде всего потивофильтрационных экранов, полигоны в течение десятков и сотен лет способны оказывать негативное воздействие на компоненты окружающей среды, включая почвы.

Среди широкого перечня веществ–загрязнителей почв наиболее опасными являются тяжелые металлы (ТМ). Почва, благодаря своим свойствам и огромной площади активной поверхности тонкодисперсной части, способна к депонированию токсичных соединений. Одновременно она становится одним из важнейших биогеохимических барьеров для большинства поллютантов на пути их миграции из атмосферы в поверхностные и грунтовые воды [2; 3].

Цель данного исследования – определить содержание тяжелых металлов в лесных подстилках и поверхностных слоях почв в зонах влияния полигонов ТКО, претендующих на статус межрайонных объектов.

Методы и материал исследований

Исследовались почвы в зонах влияния шести полигонов ТКО: г. Пинска (д. Вулька-Городищенская), г. Кобрин (д. Каташи), г. Бреста (окрестности д. Струга), г. Баранович (д. Деревная), г. Березы (д. Речица) и г. Лунинца.

Пробные площадки (ПП) закладывались по предполагаемому градиенту наиболее интенсивного загрязнения прилегающих к полигонам ТКО природных и агроэкосистем. В окрестностях большинства полигонов естественная растительность представлена сосновыми лесами.

Так, вокруг полигона ТКО г. Бреста произрастают средневозрастные (50–65 лет), монодоминантные, в отдельных случаях с небольшой примесью березы бородавчатой сосняки мшистые.

Почвы дерново-подзолистые песчаные с относительно простым строением профиля. Подстилка маломощная (до трех см), горизонт A_1 не более 10–12 см, который, как правило, сменяется подзолистым горизонтом A_2 мощностью около 10 см, вниз по профилю сменяемый переходным горизонтом A_2B_1 ; с глубины около 35–40 см дифференцируется иллювиальный горизонт B_2 желто-охристой окраски.

Типичная схема закладки пробных площадок показана для полигона ТКО г. Бреста (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема расположения пробных площадок в зоне влияния полигона ТКО г. Бреста (окрестности д. Струга)

Образцы лесных подстилок и пробы почв из горизонта A_1 с глубины 0–2 см и 2–10 см отбирались в 2021–2022 гг. методом конверта по ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Методы отбора проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа», а также ТКП 17.03-02-2020 (33140) «Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами».

Их исследования на содержание ТМ проводились в условиях аккредитованных лабораторий Полесского аграрно-экологического института Национальной академии наук Беларуси методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой iCAP 7200 DUO в соответствии с ГОСТ ISO 22036-2014 «Качество почвы».

Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы».

Оценка степени загрязнения почв проводилась методом сравнения с ПДК/ОДК, а также с фоновыми показателями.

Коэффициент концентрации (или аномальности) (K_c) элемента определялся отношением его фактического содержания в точке опробования к содержанию в аналогичной природной среде на фоновом участке: $K_c = C_i / C_f$, где C_i – содержание химического элемента в точке опробования, C_f – среднее содержание элемента на фоновом участке.

Порогом аномальности считалось 1,5-кратное превышение фона. При расчетах K_c использовались следующие значения концентрации ТМ в дерново-подзолистых

почвах юго-запада Беларусі (субрегиональный фон), мг/кг: Pb – 5,59; Cd – 0,05; Cu – 1,27; Zn – 7,39; Mn – 107,32; Ni – 0,60; Co – 0,26; Cr – 1,88 [4].

В необходимых случаях для расчета Кс использовались данные по местному геохимическому фону элементов. Согласно [5], при значении Кс от 5 до 10 загрязнение считалось слабым, от 10,1 до 30 – умеренным, при значении более 30 – сильным.

Определялся также суммарный индекс загрязнения почв (СИЗп) в виде суммы Кс исследованных элементов.

Результаты и их обсуждение

Геохимическое состояние почвенного покрова в зонах влияния исследуемых полигонов ТКО в целом не вызывает опасений.

Вместе с тем сравнительный анализ содержания ТМ в подстилках и почвах показывает, что в импактных зонах целого ряда полигонов на некоторых ПП фиксируются концентрации наиболее токсичных элементов (Pb, Cd, Zn, As – 1-й класс опасности), приближающиеся к уровням их ПДК в почвах для валовых форм и даже превышающие их.

Так, в зоне влияния полигона ТКО г. Пинска на юг-юго-восточной трансекте на двух ПП содержание As составило 0,98 мг/кг и 1,92 мг/кг почвы, или 0,5 и 0,96 ПДК соответственно.

На юго-западной трансекте в окрестностях полигона ТКО г. Кобрин на двух ПП концентрации Pb в почве составили 23,59 мг/кг (0,74 ПДК) и 16,54 мг/кг (0,5 ПДК), а Cd – 0,24 мг/кг и 0,25 мг/кг (0,5 ПДК).

В верхнем слое захороненной под телом данного полигона почвы (северо-восточная окраина полигона) усредненное содержание Zn достигло 90,79 мг/кг (1,65 ПДК), Cd – 0,30 мг/кг (0,6 ПДК), Cu – 16,43 мг/кг (0,5 ПДК), Pb – 13,91 мг/кг (0,44 ПДК).

В зоне влияния полигона ТКО г. Бреста в подавляющем большинстве случаев накопление металлов в пробах почв и подстилок укладывается в нормы ПДК.

Вместе с тем фиксируются отдельные случаи превышений опасных элементов в подстилках.

Так, в пределах ПП 14 и 15 южной трансекты (рисунок 1) содержание Cd в подстилке достигало 0,53 мг/кг или 1,1 ПДК, что в 5,9 раза выше субрегионального фона элемента для дерново-подзолистых песчаных почв (0,09 мг/кг). Концентрация Zn составила соответственно 42,85 мг/кг и 49,62 мг/кг (0,78–0,9 ПДК).

Графическое отображение геохимической ситуации на западной трансекте – наиболее обеспеченной ПП – в отношении приоритетных в санитарно-гигиеническом аспекте элементов (Cd, Pb и Zn) представлено на рисунке 2.

Показано, что содержание Cd в подстилках изменяется от 0,26 мг/кг до 0,44 мг/кг (0,52–0,88 ПДК) и в 2,9–4,9 раза превышает субрегиональный фон металла.

В слоях собственно почв накопление Cd, как правило, не выходит за пределы субрегионального фона; лишь в непосредственной близости от тела полигона (ПП 1) оно несколько превышает фоновую величину, достигая 0,11 мг/кг.

Заметное накопление Cd в подстилках на фоне его низких концентраций в слоях собственно почвы свидетельствует о преимущественно аэрогенном поступлении элемента в экосистему.

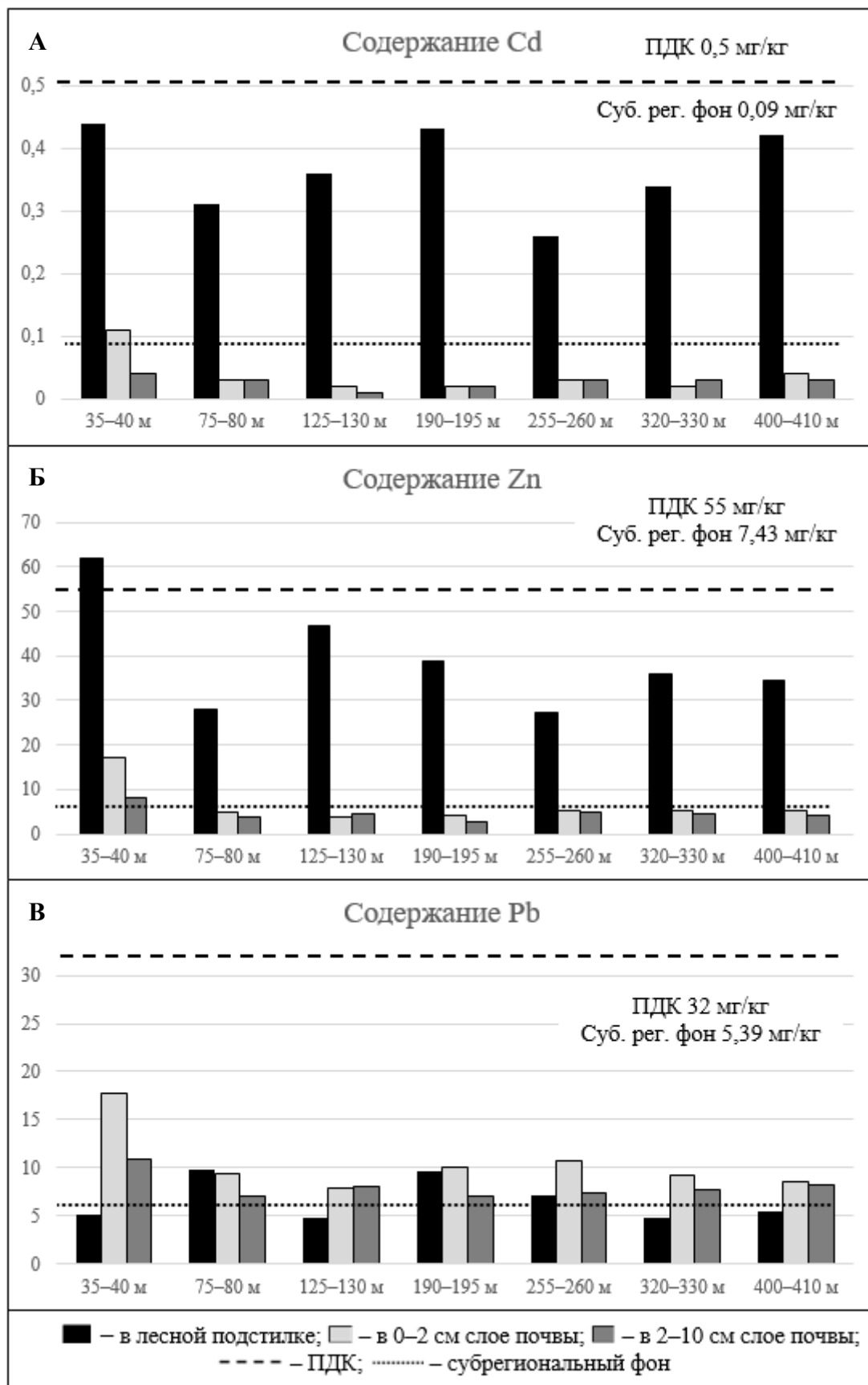


Рисунок 2 – Содержание кадмия (А), цинка (Б) и свинца (В) в подстилках и почвах в зоне влияния полигона ТКО г. Бреста (окрестности д. Струга, западная трансекта)

На упомянутой ПП 1 в подстилке зафиксировано превышение ПДК Zn – 61,95 мг/кг при допустимом уровне 55,0 мг/кг (1,13 ПДК). В слое 2–10 см концентрация элемента составила 17,27 мг/кг (0,31 ПДК, или 2,3 фоновых величины), а в горизонте A_1 – 7,97 мг/кг, что несколько выше субрегионального фона элемента (7,43 мг/кг). Во всех остальных рассматриваемых случаях превышений по Zn над контрольными значениями не обнаружено.

Некоторые специфические особенности поведения в рассматриваемых слоях почв характерны для свинца. В сравнении с ранее рассмотренными элементами – Cd и Zn – минимальные концентрации металла отмечаются в подстилках, что свидетельствует о незначительном аэрогенном перемещении элемента.

Максимальные уровни накопления Pb, как правило, наблюдаются в самом верхнем, наиболее гумусированном слое почв и варьируют от 7,87 мг/кг до 17,73 мг/кг (0,2–50,55 ПДК, или 1,46–3,29 фонового уровня). В десятисантиметровом слое почвы (горизонт A_1) концентрация элемента составляет 6,98–10,83 мг/кг, несколько превышая субрегиональный фон.

Почвенные образцы в локации полигона ТКО г. Барановичи отобраны в контурах двух контрастных типов земель: на пахотных угодьях (северо-восточная и юго-восточная трансекты; на каждой по пять ПП) и на землях лесного фонда в сосняках мшистых (юг-юго-западная и запад-юго-западная трансекты; на каждой по три ПП). Кроме того, пробы отобраны в пределах островного участка сосняка в 250 м севернее въезда на полигон.

Ввиду отсутствия данных по содержанию ТМ в почвах фоновых территорий Предполесской ландшафтной провинции для расчета Кс элементов в зоне влияния полигона ТКО г. Барановичи определялся их местный геохимический фон на основе данных по крайним ПП, т. е. наиболее удаленным от тела полигона.

Результаты исследований показывают, что в импактной зоне полигона существенного загрязнения ТМ пахотных почв не наблюдается – на большинстве ПП соответствующие показатели находятся в области значений, характерных местному геохимическому фону. Вместе с тем для ряда элементов (Pb, Ni, Cr, As) отмечается тенденция к увеличению содержания в почвах ПП обоих агроландшафтных трансект.

Так, концентрации Ni, Cr, As превышают фоновые значения на 7–14 %, а Pb – на 14–28 %. При этом в обоих случаях превышения фиксируются на некотором удалении от тела полигона, начиная со второй ПП и включая две последующие. Безусловно, регулярная вспашка с перемешиванием слоев почв до глубины около 20 см приводит к их гомогенизации и нивелированию общей картины загрязнения. В наиболее отчетливом виде она проявляется в пределах лесных трансект с относительно не нарушенным почвенным покровом, особенно на запад-юго-западном градиенте, примерно совпадающем с направлением тока грунтовых вод через тело полигона.

Общей закономерностью здесь является довольно значимое накопление Pb, Cr и As в верхнем почвенном горизонте, особенно в поверхностном 0–2 см слое. Так, содержание Pb на ближней к полигону ПП достигает 23,55 мг/кг ($K_c = 2,53$), что существенно превышает порог аномальности ($K_c > 1,5$). Распределение Pb в латеральном измерении (по трансекте) в обоих рассматриваемых слоях имеет выраженный градиентный характер, что не оставляет сомнений в источнике загрязнений. При этом на двух ближних к полигону ПП оно является константно аномальным в обоих исследуемых слоях, а на крайней ПП – лишь в слое 0–2 см (16,88 мг/кг, $K_c = 1,8$).

Накопление Cr и As является менее контрастным: для Cr максимальное значение $K_c = 1,30$ отмечается в слое 0–2 см на второй от полигона ПП. Аномальность содержания As зафиксирована лишь на третьей ПП: $K_c = 1,52$ (2,58 мг/кг).

Характерно, однако, что в границах данной трансекты, а также на островном участке сосняка концентрация As константно превышает уровень ПДК элемента в почвах (2,0 мг/кг).

Показатель ПДК превышен также и на большей части юг-юго-западной трансекты – на второй и 3-й ПП, где содержание элемента составляет от 2,01 до 2,26 мг/кг. Все это свидетельствует о формировании в зоне влияния полигона ТКО г. Барановичи техногеохимической аномалии мышьяка. Учитывая, что его концентрации в почвах земель сельскохозяйственного назначения также приближаются к уровню ПДК, достигая на отдельных ПП уровня 1,89–1,94 мг/кг, должны планироваться мероприятия по предотвращению соответствующих рисков. В их перечне ведущая роль может принадлежать сооружению техногенных геохимических барьеров на наиболее проблемных сегментах периметра тела полигона.

Полиэлементное загрязнение свойственно также подстилкам сосняков: наиболее высокие показатели фиксируются на запад-юго-западной трансекте и имеют ярко выраженный градиентный характер. Учитывая, что слой подстилок сформирован опадом хвои сосны, которая согласно [6] обладает высокой способностью к сорбции загрязняющих веществ, переносимых воздушным путем, логично предположить, что в локациях преобладает аэрогенный трек переноса в подстилки перечисленных элементов.

Отсутствие в значимых концентрациях в подстилках элементов, идентифицированных нами в качестве приоритетных загрязнителей почв – Pb, Ni, Cr, As, может свидетельствовать о существенной роли гидрогенного (от грунтовых вод) пути их поступления в почву.

Почвенно-геохимические исследования в импактной зоне полигона ТКО г. Береза (окрестности д. Речица) проведены в 2-х локалитетах: в сосняке ландышево-мшистом правее административного здания полигона и в сосняке мшистом севернее северного угла ограды полигона. В границах первого локалитета по большинству элементов не зафиксировано существенного превышения их содержания в почвах в сравнении с фоновыми показателями. Вместе с тем здесь выявлена довольно контрастная геохимическая аномалия по свинцу, особенно в верхнем 0–2 см слое. При этом она характерна для обеих ПП с расстоянием между ними в 30 м, что исключает случайный точечный характер загрязнения. Содержание Pb на 1-й ПП составляет 14,71 мг/кг (Кс по местному фону = 6,5), на 2-й – в 1,6 раза выше: 23,67 мг/кг (Кс = 10,5). В слое 2–10 см концентрация элемента существенно снижается и составляет соответственно 8,57 мг/кг (Кс = 3,8) и 9,11 мг/кг (Кс = 4,0). Несколько повышенными в сравнении с фоном являются концентрации Cd и Zn в поверхностном 0–2 см слое почв, особенно в подстилке, где содержание элементов достигает 0,42 мг/кг и 57,49 мг/кг соответственно (при фоновых значениях 0,12 мг/кг и 28,56 мг/кг).

Возникновение этой аномалии, на наш взгляд, не связано с аэрогенным поступлением элемента в почву – содержание, к примеру, Pb в коре сосны (чувствительный индикатор аэрогенного загрязнения среды) здесь ниже фоновой концентрации (2,42 мг/кг) и в среднем составляет 1,37 мг/кг. Исключен и гидрогенный привнос элемента – площадки расположены на гипсометрически наиболее высоких уровнях с весьма низким стоянием грунтовых вод (на глубине до 11 м), ток которых ориентирован в сторону полигона. Расположение рассматриваемых ПП в непосредственной близости от административно-бытовых и хозяйственных построек, стоянок и мест ремонта техники позволяет предположить и соответствующий генезис геохимических аномалий Pb, Cd и Zn в данном локалитете.

Гораздо более серьезной выглядит почвенно-геохимическая ситуация в 15–18-летнем сосняке в 30-и м от северного выступа (угла) полигона (ПП-3). Здесь обнаружена никель-ванадиевая геохимическая аномалия; ее контрастность особенно высока в слое подстилок,

где содержание Ni достигает 322,4 мг/кг ($K_c = 190,8$), V – 91,3 мг/кг ($K_c = 30,0$), что соответствует сильному загрязнению. Характерно также, что в отношении данных ТМ и большинства других элементов-загрязнителей наблюдается отчетливый градиент в их радиальном распределении. Так, содержание Ni в 0–2 см слое почвы уменьшается в 2,6 раза – до 123,2 мг/кг, а в 2–10 см – до 32,01 мг/кг, т. е. еще в 3,9 раза. Примерно такие же соотношения величин в радиальном уменьшении концентраций свойственны и ванадию – снижение в 2,6 раза (с 91,3 до 35,3 мг/кг) и в 3,4 раза (с 35,3 до 10,5 мг/кг) соответственно.

Аномальность содержания в подстилке и 0–2 см слое почв свойственна также Cr ($K_c = 8,0$ и 2,3), Co ($K_c = 5,9$ и 2,6), Fe ($K_c = 5,2$ и 2,0), Zn ($K_c = 2,0$ и 4,1). Вместе с тем, существенного накопления перечисленных элементов, особенно Ni и V, в коре сосны на данной ПП не выявлено, что исключает аэрогенный путь их поступления в подстилку и почву. Резкое уменьшение их концентраций с глубиной свидетельствует об отсутствии и гидрогенного (от загрязненных грунтовых вод) их привноса. Учитывая, что столь сильное загрязнение обнаружено лишь на ближней к телу полигона ПП, расположенной примерно в 50 м от канавы и колодца для сбора фильтрата, а на остальных ПП (четвертой и пятой), удаленных от края полигона на 90 и 120 м соответственно, геохимические показатели соответствуют фону, логично предположить, что генезис выявленной аномалии связан с поверхностным током сильно загрязненной жидкости, т. е. фильтрата. Наиболее вероятный сценарий – его поступление в контур ПП-3 из переполненной канавы (колодца) для сбора фильтрата в сильно дождливый период весны текущего года. Переливы фильтрата из переполненных канав отмечались и на других полигонах, например, на полигоне ТКО г. Пинска (д. Вулька-Городищенская), что актуализирует проблему совершенствования существующей системы сбора фильтрата и обращения с ним.

Своего выяснения требует и никель-ванадиевая специфика выявленной аномалии. Из литературных источников известно, что высокие концентрации соединений V и Ni обнаруживаются в твердых продуктах сжигания мазутов на ТЭЦ и ГРЭС [7]. Поэтому источник V и Ni, вероятнее всего, связан с функционированием Березовской ГРЭС. Ранее проведенные исследования в ее ареале подтверждают данное предположение: геохимия почвогрунтов в запад-юго-западном секторе санитарно-защитной зоны станции имеет ванадий-никелевую специализацию с существенным превышением фона также по Cr, Co, Fe, Zn и As. В этой связи имеются веские основания предполагать, что в качестве одного из компонентов противофильтрационного экрана при обустройстве полигона г. Березы использованы материалы, содержащие твердые продукты сжигания мазута. Не исключается также поступление на захоронение Ni–V-содержащих отходов местных промышленных предприятий.

В импактной зоне полигона ТКО г. Лунинца на восток-северо-восточной трансекте в ближнем к полигону радиусе (до 50 м) отмечается тенденция к накоплению некоторых элементов 1-го класса опасности в поверхностном 0–2 см слое почв. Так, содержание Zn на ближайшей к телу полигона ПП достигает 57,72 мг/кг, что выше показателя ПДК элемента (55,0 мг/кг). В контуре 2-й ПП этой трансекты концентрация Pb превысила порог аномальности и составила 10,62 мг/кг ($K_c = 1,9$). В рассматриваемом секторе в ближней к полигону зоне отмечается также заметное повышение содержания Pb в коре сосны – 3,07 мг/кг, что заметно выше фонового уровня. Учитывая, что рассматриваемый участок находится на оси преобладающих в локации ветров, а лесной пояс здесь отличается максимальной захламленностью мусором, сносимым с поверхности эксплуатируемых карт, генезис выявленных загрязнений однозначно связан с аэрогенным переносом поллютантов.

Обобщенная геохимическая специфика почв в зонах влияния исследуемых полигонов приведена в таблице.

Таблица – Обобщенные показатели загрязнения почв в зонах влияния полигонов ТКО Брестской области

Полигон / показатель		Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Ni	Co	Cr	SIZп	среднее
Пинск	1 ¹	3,49	0,04	1,64	9,69	79,15	1,04	0,52	3,44		
	2 ²	0,65	0,44	1,27	1,30	0,72	1,58	1,16	1,83	8,95	1,12
Барановичи	1	8,11	0,04	3,43	16,44	186,2	4,81	2,08	11,45		
	2	0,87	1,33	1,51	1,02	1,01	1,08	1,11	0,97	8,90	1,11
Брест	1	9,12	0,03	1,10	8,58	40,63	1,40	0,49	3,76		
	2	1,69	0,34	0,85	1,15	0,37	2,12	1,09	2,00	9,61	1,20
Кобрин	1	5,84	0,11	1,90	10,41	24,84	1,47	0,53	3,59		
	2	1,08	1,25	1,47	1,40	0,23	2,23	1,17	1,91	10,74	1,34
Береза	1	2,31	0,00	1,06	9,57	21,61	2,12	0,88	8,71		
	2	0,43	0,00	0,82	1,29	0,20	3,21	1,96	4,63	12,54	1,57
Лунинец	1	7,47	0,04	1,96	19,37	81,86	2,45	0,83	5,00		
	2	1,39	0,44	1,52	2,61	0,75	3,71	1,83	2,66	14,91	1,86
СФ-1 ³	–	5,39	0,09	1,29	7,43	109,6	0,66	0,45	1,88	–	–
СФ-2 ⁴	–	9,29	0,03	2,28	7,43	184,7	4,47	1,87	11,85	–	–

Примечание – ¹ – средняя концентрация загрязнителя в почве, мг/кг; ² – превышение по отношению к субрегиональному фону, Кс; ³ – субрегиональный фон (для полигонов ТКО городов Брест, Береза, Пинск, Лунинец, Кобрин); ⁴ – местный фон для полигона ТКО г. Барановичи; полужирным шрифтом выделены максимальные значения Кс для каждого полигона.

Наиболее высокий суммарный индекс загрязнения почв характерен для зоны воздействия полигона ТКО г. Лунинца (SIZп = 14,91); в импактных зонах полигонов ТКО городов Пинска и Барановичи этот показатель в 1,7 раза ниже – SIZп около 8,9).

Ряд приоритетности загрязнения почв в зонах воздействия полигонов ТКО ТМ и микроэлементами имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Пинск, Барановичи}}{8,9} < \frac{\text{Брест}}{9,61} < \frac{\text{Кобрин}}{10,74} < \frac{\text{Береза}}{12,54} < \frac{\text{Лунинец}}{14,91}$$

Сравнительный анализ геохимических рядов накапливаемых элементов позволяет сделать вывод о том, что почвам в зонах влияния большинства полигонов ТКО характерна никель-хромовая специализация.

Заключение

Таким образом, установлено, что в большинстве случаев накопление ТМ в пробах почв и подстилок, отобранных в окрестностях исследованных полигонов ТКО, укладывается в нормы ПДК. Вместе с тем фиксируются отдельные случаи превышений установленных санитарно-гигиенических норм опасных элементов в подстилках, а также в некоторых пробах почв импактных зон полигонов ТКО; примерно в 30 % рассмотренных случаев зафиксированы превышения фоновых концентраций элементов. Почвы в зонах влияния большинства рассматриваемых полигонов ТКО отличаются никель-хромовой специализацией. В окрестностях полигона ТКО г. Барановичи установлено формирование техногеохимической аномалии мышьяка, в ближнем к полигону ТКО г. Березы радиусе (северный сектор) выявлена контрастная никель-ванадиевая геохимическая аномалия. Наиболее высокий суммарный индекс загрязнения почв характерен для зон воздействия полигонов ТКО городов Лунинец и Береза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах / Д. М. Ерошина [и др.] // Минск : БелНИЦ «Экология», 2010. – 152 с.
2. Саєт, Ю. Е. Геохімічныя прынцыпы выяўлення зон уздзеяння прамышленых выбросов в городских агломерациях / Ю. Е. Саєт, Р. С. Смирнова // Вопр. географии. – 1983. – № 120. – С. 45–55.
3. Ильин, В. Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам / В. Б. Ильин // Агрохимия. – 1995. – № 10. – С. 109–113.
4. Михальчук, Н. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почвах и растительности юго-запада Беларуси как основа для сравнительных оценок при производстве органической продукции на основе принципов зеленой экономики / Н. В. Михальчук, А. Н. Мялик // Эколога-географічныя праблемы перахода к зеленой экономике / редкол.: В. С. Хомич (гл. ред.), В. Ф. Логинов, Е. В. Санец. – Минск : СтройМедиаПроект, 2019. – С. 266–281.
5. Добровольский, Г. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами / Г. В. Добровольский // Почвоведение. – 1999. – № 5. – С. 639–645.
6. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study / K.-E. Saarela [et al.] // Sci. Tot. Environ. – 2005. – Vol. 343, nr 13. – P. 231–241.
7. Гринь, С. А. Влияние на литосферу ванадий-содержащих отходов энергетических установок / С. А. Гринь, П. В. Кузнецов // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2009. – № 1/4 (37). – С. 44–47.

REFERENCES

1. Ekologichieskije aspiekty zakhoronienija tviorдых kommunal'nykh otkhodov na poligonakh / D. M. Jeroshina [i dr.] // Minsk : BielNIC «Ekologija», 2010. – 152 s.
2. Sajet, Yu. Ye. Gieokhimichieskije principy vyjavlienija zon vozdiejstvija promyshliennykh vybrosov v gorodskikh aglomeracijakh / Yu. Ye. Sajet, R. S. Smirnova // Vopr. geografii. – 1983. – № 120. – S. 45–55.
3. Il'in, V. B. Ocenka bufiernosti pochv po otnosheniju k tiazholym mietallam / V. B. Il'in // Agrokhimija. – 1995. – № 10. – S. 109–113.
4. Mikhal'chuk, N. V. Fonovoje sodierzhanije tiazholych mietallov i mikroeliemientov v pochvakh i rastitel'nosti jugo-zapada Bielarusi kak osnova dlja sravnitel'nykh ocenok pri proizvodstvie organichieskoj produkcii na osnovie principov zielionoj ekonomiki / N. V. Mikhal'chuk, A. N. Mialik // Ekologo-geografichieskije problimy pieriekhoda k zielionoj ekonomike / riedkol.: V. S. Khomich (gl. ried.), V. F. Loginov, Ye. V. Saniec. – Minsk : StrojMiediaProjekt, 2019. – S. 266–281.
5. Dobovol'skij, G. V. Landshaftno-gieokhimichieskije kriterii ocenki zagriaznienija pochviennogo pokrova tiazholymi mietallami / G. V. Dobovol'skij // Pochvoviedienije. – 1999. – № 5. – S. 639–645.
6. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study / K.-E. Saarela [et al.] // Sci. Tot. Environ. – 2005. – Vol. 343, nr 13. – P. 231–241.
7. Grin', S. A. Vlijanije na litosfieru vanadij-sodierzhashchikh otkhodov energietichieskikh ustanovok / S. A. Grin', P. V. Kuzniecov // Vost.-Jevrop. zhurn. pieriedovykh tiekhnologij. – 2009. – № 1/4 (37). – S. 44–47.

УДК 550.4 (476.7)

Оксана Олеговна Никитюк¹, Максим Альбертович Богдасаров²

¹магистр геогр. наук, аспирант 2-го года обучения каф. географии и природопользования
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²д-р геол.-минерал. наук, проф., член-кор. Национальной академии наук Беларуси,
проф. каф. географии и природопользования

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Oksana Nikitsiuk¹, Maksim Bogdasarov²

¹Master of Geographical Sciences, 2-nd Year Postgraduate Student
of the Department of Geography and Environmental Management
of Brest State A. S. Pushkin University

²Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus,
Professor of the Department of Geography and Nature Management
of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: ¹dorozhko070996@mail.ru; ²bogdasarov73@mail.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬЮ ВЗРОСЛОГО НАСЕЛЕНИЯ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

Представлен анализ состояния атмосферного воздуха Брестской области. Выявлены основные источники загрязнения, проанализирована структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников. В результате корреляционного анализа выявлена взаимосвязь между заболеваемостью взрослого населения Брестской области и загрязняющими веществами в атмосферном воздухе.

Ключевые слова: атмосферный воздух, заболеваемость, Брестская область, корреляционный анализ, поллютанты, взрослое население, стационарные источники, мобильные источники.

Interrelation of the State of Atmospheric Air with Incidence in the Adults of the Brest Region

An analysis of the state of atmospheric air in the Brest region is presented. The main sources of pollution have been identified, the structure of emissions of pollutants into the atmospheric air from stationary sources has been analyzed. As a result of the correlation analysis, the relationship between the incidence of the adult population of the Brest region and pollutants in the air was revealed.

Key words: atmospheric air, morbidity, Brest region, correlation analysis, pollutants, adult population, stationary sources, mobile sources.

Введение

Медико-экологические исследования – это процесс выявления воздействия вредных факторов на состояние здоровья населения. К ним относятся факторы, которые имеют отношение к образу жизни людей, факторы, связанные с состоянием окружающей среды, и др. Важной задачей медико-экологических исследований является установление роли как отдельных факторов, так и их интегрального воздействия на здоровье населения.

Анализ медико-экологического состояния территории включает оценку качества среды обитания и здоровья популяции по нескольким группам показателей: экологическое состояние окружающей среды; показатели изменения здоровья населения – заболеваемость, медико-демографические характеристики – и др. [1]. Важным также является анализ причинно-следственных связей между качественными и количественными характеристиками вредного фактора и реакцией организма людей.

Анализ состояния воздушной среды является весьма значимым при проведении медико-экологических исследований, поскольку, как показывают исследования, одним из основных путей поступления химических соединений в организм человека является

респираторный. Антропогенные загрязнения окружающей среды и поступление в организм человека поллютантов из воздуха вызывает острые интоксикации, а также состояния со специфической симптоматикой, хронические состояния, ухудшение функции внешнего дыхания [2; 3].

Анализ накопленных научных данных по влиянию атмосферных загрязнений на заболеваемость населения продолжает оставаться одной из актуальных проблем. Материалы этих исследований необходимы для установления причин тех или иных болезней и разработки профилактических мероприятий. Загрязненная атмосфера может оказывать как прямое влияние на возникновение болезни, так и выступать как условие, способное усилить действие патогенных агентов на фоне снижения резистентности организма. По данным ВОЗ, здоровье население на 20 % зависит от состояния окружающей среды. В исследованиях М. Ф. Савченкова, К. А. Буштуева, В. П. Мелехиной, М. В. Загурской и В. А. Астафьевой установлено, что одно из ведущих мест среди заболеваний, связанных с загрязнением атмосферы, занимает бронхолегочная патология, острые инфекции дыхательных путей, фарингиты, пневмонии, бронхиты) [4].

Методика исследования

В качестве меры зависимости между заболеваемостью взрослого населения и природным факторами и показателями применен коэффициент корреляции (r), который изменяется в пределах от -1 до $+1$.

Принято считать, что при $r < \pm 0,19$ связь очень слабая, $\pm 0,20 \leq r \leq \pm 0,29$ – слабая связь, $\pm 0,30 \leq r \leq \pm 0,49$ – умеренная связь, $\pm 0,50 \leq r \leq \pm 0,69$ – средняя связь, $r \geq \pm 0,70$ – сильная связь. При $r = 0$ нет взаимосвязи двух показателей. Информационной базой для проведения исследования стали статистические, фондовые и литературные материалы, собранные в:

1) отделе медицинской статистики Брестской областной клинической больницы по следующим классам патологий: некоторые инфекционные и паразитарные болезни; новообразования, злокачественные и доброкачественные новообразования; болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм; болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ; психические расстройства и расстройства поведения; болезни нервной системы; болезни глаза и его придаточного аппарата; болезни уха и сосцевидного отростка; болезни системы кровообращения; болезни органов дыхания; болезни органов пищеварения; болезни кожи и подкожной клетчатки; болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани; болезни мочеполовой системы; врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения; травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин;

2) Брестском областном комитете природных ресурсов и охраны окружающей среды по валовому объему выбросов в атмосферу в разрезе районов Брестской области; также проведен анализ информационно-аналитических справочников «Статистический ежегодник Брестской области», «Экологический бюллетень» и литературных источников.

Результаты и их обсуждение

Брестская область не выделяется масштабами воздействия на атмосферный воздух, т. к. на территории области нет крупных предприятий тяжелой промышленности, предприятий нефтепереработки, химической промышленности, которые бы оказывали существенное негативное воздействие на окружающую среду.

Основную часть выбросов в атмосферу обеспечивают мобильные источники – 116,1 тыс. т в 2018 г. Это 79 % от общих объемов выбросов в атмосферный воздух об-

ласти. Для сравнения: в 2001 г. общий объем выбросов от мобильных источников составил 147,4 тыс. т (рисунок 1).

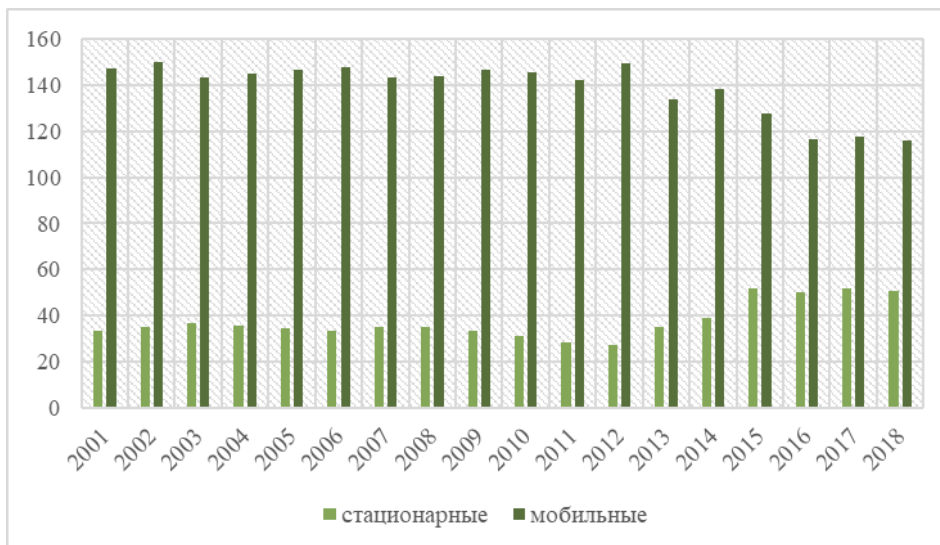


Рисунок 1 – Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных и стационарных источников за 2001–2018 гг.

Уменьшение общего объема выбросов от мобильных источников обусловлено значительным сокращением количества грузового транспорта в хозяйстве и предприятиях области. Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в Брестской области являются одними из самых низких в республике, что составляет в 1,3 раза ниже среднего общереспубликанского значения в расчете на одного жителя. Уровень выбросов в атмосферу аэротехногенных поллютантов различен для каждого района Брестской области.

Значительную часть выбросов составляют такие вещества, как оксид углерода, оксид азота и углеводороды, а наименьшее количество отмечается по летучим органическим соединениям и диоксиду серы (рисунок 2).

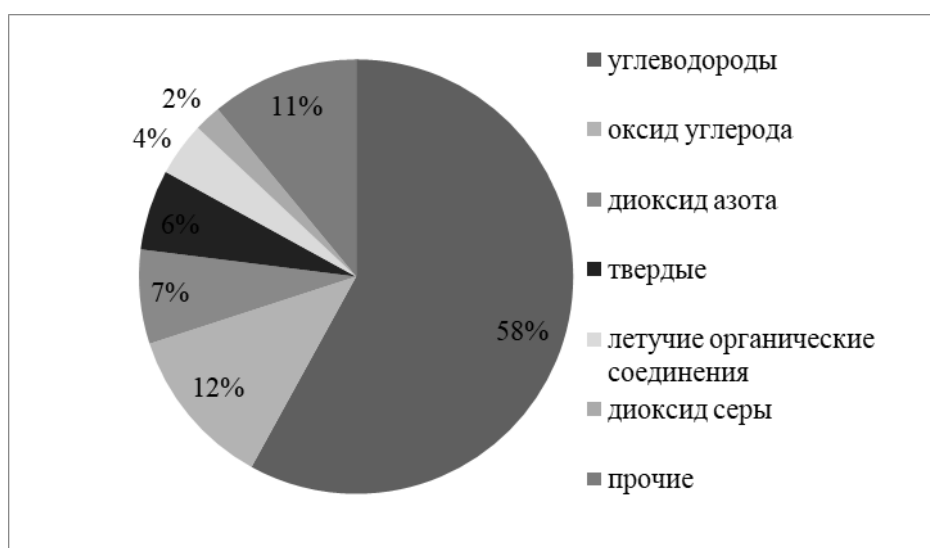


Рисунок 2 – Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников

Общий объем выбросов в атмосферный воздух от стационарных источников составляет 50,6 тыс. т. При этом 8,2 тыс. т происходит от сжигания топлива и 42,4 тыс. т от технологических и других процессов. С общим количеством выбросов 3,2 тыс. тонн составляют твердые выбросы, а 47,5 тыс. т – жидкие и газообразные. Общий объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в разрезе административных районов представлен на рисунке 3.

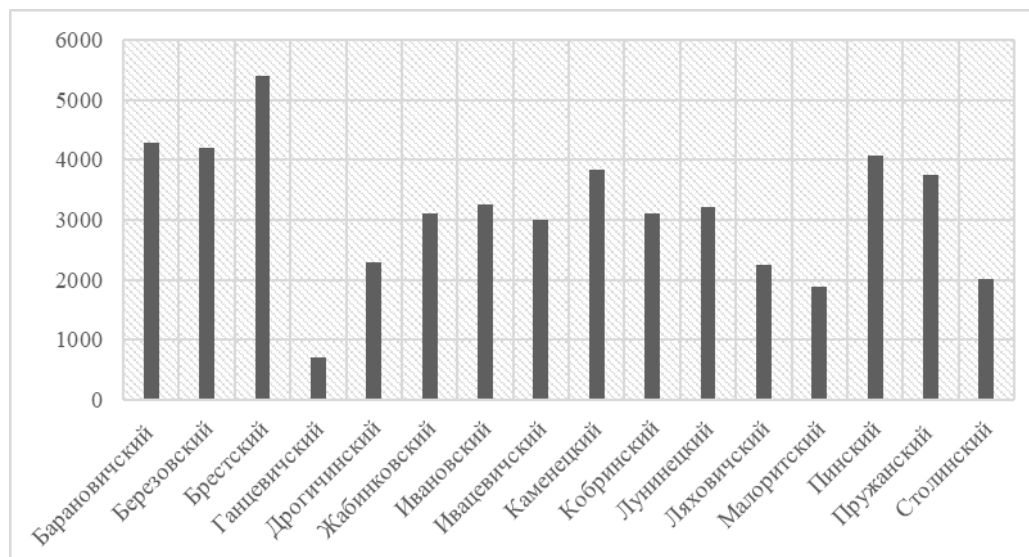


Рисунок 3 – Общий выброс в атмосферу загрязняющих веществ по административным районам Брестской области (2018 г.), т

Корреляционный анализ между выбросами от стационарных источников и заболеваемостью позволил установить следующее: умеренная взаимосвязь отмечается с болезнями органов дыхания (острые респираторные инфекции, бронхиальная астма), слабая взаимосвязь фиксируется с болезнями системы кровообращения и болезнями крови, кроветворных органов и отдельных нарушений, вовлекших иммунный механизм. С остальными классами патологий как общей, так и первичной заболеваемости связь очень слабая (болезни кожно-мышечной системы и соединительной ткани, травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин) либо вовсе отсутствует (некоторые инфекционные и паразитарные болезни, новообразования, болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ, психические расстройства и расстройства поведения, болезни нервной системы, болезни органов пищеварения и болезни мочеполовой системы).

Результаты корреляционного анализа между загрязняющими веществами в атмосфере и группами нозологий представлены в таблице 1.

В результате корреляционного анализа между содержанием твердых веществ в атмосферном воздухе и группами патологий установлена средняя взаимосвязь с болезнями крови, умеренная – с болезнями системы кровообращения и болезнями органов дыхания. С инфекционными и психическими расстройствами связь вовсе не установлена, а с остальными группами болезней отмечается очень слабая и слабая взаимосвязь.

Полученные результаты корреляционного анализа между содержанием диоксида серы в атмосферном воздухе исследуемой территории и группами патологий указывают на следующие уровни взаимосвязи: средняя связь установлена с болезнями органов дыхания и болезнями крови; умеренная связь – с болезнями системы кровообращения; слабая или очень слабая зафиксирована с инфекционными, злокачественными и добро-

качественными новообразованиями, болезнями эндокринной системы, болезнями кожи и подкожной клетчатки, психическими расстройствами и болезнями нервной системы, болезнями органов пищеварения, костно-мышечной системы и соединительной ткани, травмами и отравлениями. С болезнями мочеполовой системы взаимосвязь отсутствует.

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа между заболеваемостью населения Брестской области и загрязняющими веществами в атмосферном воздухе

Группы болезней	Загрязняющие вещества					
	Твердые вещества	Диоксид серы	Оксид углерода	Диоксид азота	Угледороды	Летучие органические соединения
Некоторые инфекционные и паразитарные болезни	0	0,11	0,15	-0,13	0,21	0,20
Новообразования	0,21	0,22	-0,01	-0,1	0,10	0,18
Злокачественные новообразования	0,20	0,05	0,02	-0,15	0,13	0,23
Доброкачественные новообразования	0,10	0,03	0,19	-0,25	0,07	-0,15
Болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекшие иммунный механизм	0,63	-0,58	-0,47	0,51	0,55	0,42
Психические расстройства и расстройства поведения	0	0,01	0,27	0,16	0,09	0,05
Болезни нервной системы	-0,27	0,16	-0,9	-0,11	-0,10	0,04
Болезни системы кровообращения	0,30	0,35	0,53	0,42	-0,29	-0,48
Болезни органов дыхания	0,41	-0,65	0,48	-0,51	0,42	0,44
Болезни органов пищеварения	0,15	0,15	0,19	0,20	0	0,13
Болезни мочеполовой системы	0,18	0	-0,19	-0,17	0,17	0,28
Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани	0,21	0,08	0,20	0,02	0,12	0,22
Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ	0,18	0,15	0	-0,23	-0,20	0,19
Болезни кожи и подкожной клетчатки	0,13	-0,12	-0,11	0,09	0,11	0,14
Травмы, отравления и некоторые другие последствия внешних причин	0,24	0,11	-0,14	0,08	-0,19	-0,25

Выполненный анализ связи между повышенным содержанием оксида углерода в атмосферном воздухе и группами патологий показал, что средняя связь фиксируется

с болезнями системы кровообращения. Умеренная связь зафиксирована с болезнями органов дыхания и болезнями крови. С остальными из рассматриваемых групп нозологий установлена слабая или очень слабая взаимосвязь, а с болезнями эндокринной системы связь не установлена.

Полученные результаты корреляционного анализа между содержанием диоксида азота в атмосферном воздухе исследуемой территории и группами патологий указывают на следующие уровни взаимосвязи: средняя связь установлена с болезнями органов дыхания и болезнями крови; умеренная связь – с болезнями системы кровообращения; слабая или очень слабая зафиксирована с инфекционными, злокачественными и доброкачественными новообразованиями, болезнями эндокринной системы, болезнями кожи и подкожной клетчатки, психическими расстройствами и болезнями нервной системы, болезнями органов пищеварения, костно-мышечной системы и соединительной ткани, травмами и отравлениями.

Корреляционный анализ между содержанием углеводорода в атмосферном воздухе и группами болезней показал, что по большинству групп нозологий доминирует очень слабая взаимосвязь (злокачественные и доброкачественные новообразования, психические расстройства, болезни эндокринной системы, болезни кожи и подкожной клетчатки, болезни нервной системы, болезни мочеполовой системы, костно-мышечной системы и соединительной ткани, травмы и отравления). Умеренная связь – с болезнями органов дыхания, средняя связь – с болезнями крови. С болезнями органов пищеварения взаимосвязь не установлена.

В результате корреляционного анализа между содержанием летучих органических соединений в атмосферном воздухе и группами патологий установлена умеренная взаимосвязь с болезнями крови, органов дыхания и болезнями системы кровообращения. С остальными группами нозологий (инфекционными, доброкачественными и злокачественными новообразованиями, болезнями эндокринной системы, болезнями кожи и подкожной клетчатки, психическими расстройствами, болезнями нервной системы, органов пищеварения, мочеполовой системы, костно-мышечной системы и соединительной ткани, травмами и отравлениями) установлена слабая и очень слабая взаимосвязь.

Заключение

Выявлены особенности пространственно-временных колебаний состояния атмосферного воздуха. Проанализирована динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Отмечается уменьшение общего объема выбросов от мобильных источников и увеличение от стационарных источников.

Проанализирована структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Установлено, что значительную часть выбросов составляют такие вещества, как оксид углерода, оксид азота и углеводороды. Наименьшее количество отмечается по летучим органическим соединениям и диоксиду серы

На основе корреляционного анализа выявлена средняя связь болезней системы кровообращения с повышенным содержанием оксида углерода; болезней крови с повышенным содержанием диоксида серы, диоксида азота, углеводорода; болезней органов дыхания с повышенным содержанием диоксида серы и диоксида азота.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витченко, А. Н. Геоэкологическая оценка комфортности климата крупных городов Беларуси / А. Н. Витченко, И. А. Телеш // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2011. – № 2. – С. 73–78.

2. Прохоров, Б. Б. Медицинская география / Б. Б. Прохоров, С. В. Рященко. – Иркутск : Ин-т географии им. В. Б. Сочавы, 2012. – 224 с.

3. Ревич, Б. А. Экологическая эпидемиология : учебник для высш. учеб. заведений / Б. А. Ревич, С. Л. Авалиани, Г. И. Тихонова ; под ред. Б. А. Ревича. – М. : Академия, 2004. – 384 с.

4. Савченков, М. Ф. Санитарно-гигиенические нормы жизни населения Иркутской области / М. Ф. Савченков, А. Д. Гольченко, А. Г. Лобова. – Иркутск, 2001. – 198 с.

REFERENCES

1. Vitchienko, A. N. Geoeekologichieskaja ocenka komfortnosti klimata krupnykh gorodov Bielarusi / A. N. Vitchienko, I. A. Tieliesh // Viestn. BGU. Sier. 2, Khimija. Biologija. Geografija. – 2011. – № 2. – S. 73–78.

2. Prokhorov, B. B. Miedicinskaja geografija / B. B. Prokhorov, S. V. Riashchienko. – Irkutsk : In-t geografii im. V. B. Sochavy, 2012. – 224 s.

3. Rievich, B. A. Ekologichieskaja epidiemiologija : ushibnik dlja vyssh. uchieb. zaviedienij / B. A. Rievich, S. L. Avaliani, G. I. Tikhonova ; pod ried. B. A. Rievich. – M. : Acadiemija, 2004. – 384 s.

4. Savchienkov, M. F. Sanitarno-gigijenichieskije normy zhizni nasielienija Irkutskoj oblasti / M. F. Savchienkov, A. D. Gol'chienko, A. G. Lobova. – Irkutsk, 2001. – 198 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 04.09.2023

УДК 325.1+911.3 (476)

Александр Александрович Сидоровичканд. геогр. наук, доц., декан факультета естествознания
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина**Alexandr Sidorovich**Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Dean of the Faculty of Natural Sciences of Brest State A. S. Pushkin Universitye-mail: brestsid@gmail.com**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО
ОБОСНОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МИГРАЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ БЕЛАРУСИ***

Определены две стратегии миграционной политики – стратегия поддерживающего развития и стратегия конкурентного развития. Обоснована необходимость применения стратегии поддерживающего развития, позволяющей обеспечить устойчивое демографическое развитие, сохранить национальную идентичность и историко-культурное наследие. В рамках данной стратегии предложены меры стабилизации миграционной ситуации в регионах Беларуси, включающие развитие системы профессионального образования, повышения комфортности проживания и обеспечения качественной занятости населения. Эффективная реализация указанной системы мер направлена на улучшение демографической ситуации на уровне административно-территориальных районов Беларуси посредством минимизации миграционных установок на выезд из регионов, а также создания условий и стимулов для возвращения на прежнее место проживания после окончания обучения либо прохождения срочной военной службы.

Ключевые слова: миграция населения, миграционная политика, демографическая политика, демографическая ситуация, регионы Беларуси.

**Methodological Aspects of the Economic and Geographical Substantiation
of the Regional Migration Policy of Belarus**

Two strategies of migration policy have been defined – the strategy of supportive development and the strategy of competitive development. The necessity of applying a strategy of supporting development, which allows to ensure sustainable demographic development, preserve national identity and historical and cultural heritage, is substantiated. Within the framework of this strategy, measures are proposed to stabilize the migration situation in the regions of Belarus, including the development of a vocational education system, improving the comfort of living and ensuring high-quality employment for the population. The effective implementation of this system of measures is aimed at improving the demographic situation at the level of the administrative-territorial regions of Belarus by minimizing migration attitudes to leave the regions, as well as creating conditions and incentives for returning to their former place of residence after graduation or military service.

Key words: population migration, migration policy, demographic policy, demographic situation, regions of Belarus.

Введение

За период 1989–2019 гг. в Беларуси наблюдалось пространственное расширение миграционного оттока населения, увеличение удельного веса миграции в общей убыли населения и концентрация входящих миграционных потоков в ограниченном числе регионов. Ключевыми регионами и центрами притяжения мигрантов выступают столица и районы, непосредственно формирующие Минскую агломерацию либо примыкающие к ней, а также города областного подчинения [1; 2]. Основным их конкурентным преимуществом как мест проживания выступает обладание наибольшим социально-экономическим потенциалом, включающим широкий спектр сфер приложения труда, возможность обеспечения культурно-досуговой деятельности и создания комфортных условий проживания. Фактически данные центры перетягивают на себя демографический потенциал практически всех административно-территориальных районов страны,

*Исследование выполнено в рамках задания ГПНИ на 2021–2025 гг. при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь, № госрегистрации 20211332.

в значительной степени обостряя в них демографическую ситуацию. В целом внеконкурентным центром миграционного притяжения выступает г. Минск. В столицу прибывает в среднем 56 % сельских жителей, сменивших место жительства за пределами области предыдущего проживания. Также на столичный город приходится порядка 34 % прибытий городских жителей в результате межобластных миграций.

За последний межпереписной период 2009–2019 гг. в 56 административно-территориальных районах миграционная убыль являлась преобладающей составляющей общего сокращения численности населения. Еще в 42 районах на механическое движение населения приходилось от 6 до 49 % общей убыли населения [3].

Вместе с тем при сохранении темпов миграционного и естественного оттока на уровне 2010-х гг. лишь в 28 районах убыль населения к 2025 г. не превысит 5 %, в 62 районах прогнозная убыль населения составит от 5 до 10 %.

В то же время в 18 районах сокращение численности населения превысит 10 %. При сохранении текущих среднегодовых темпов убыли к 2030 г. число таких районов возрастет до 73. Вместе с тем при нулевом миграционном сальдо к 2030 г. более 10 % численности населения потеряют лишь 19 районов. В абсолютном выражении это позволит данным регионам сохранить более 220 тыс. человек.

Таким образом, при разработке приоритетных мер демографической и миграционной политики целесообразно определение вклада фактора механического (миграционного) движения в относительную динамику численности населения отдельных административно-территориальных районов. Достижение цели нулевого миграционного сальдо для подавляющего большинства районов фактически равносильно решению либо смягчению демографической проблемы депопуляции и интенсивного старения населения. Региональная демографическая политика на уровне каждого административно-территориального района во многом должна опираться на стимулирование сохранения баланса между численностью прибывших и выбывших мигрантов.

Цель работы – установление ключевых экономико-географических параметров обоснования миграционной политики Беларуси в условиях депопуляции и интенсивного старения населения.

Материалы и методика исследования

Проблема определения основных направлений демографической и миграционной политики нашла широкое отражение в научных исследованиях. А. Я. Кваша в монографии «Демографическая политика в СССР» (1981 г.) обращает внимание, что миграционные потоки часто создают структуру населения, значительно отличную от оптимальной с позиций критериев регионального развития. При этом экономические интересы приходят в противоречие с демографическими задачами. Приводится пример «текстильных городков», в которых с позиций краткосрочных экономических интересов половая структура населения с преобладанием женщин вполне приемлема. Однако с позиций социально-демографического развития такой подход несет в себе серьезные угрозы. Половые диспропорции ведут к низкому уровню брачности и, следовательно, ряду социальных проблем [4]. Ю. И. Прыткова в качестве одной из мер миграционной политики предлагает расширение адресной поддержки регионов, расселение мигрантов в которых в первую очередь отвечает экономическим и стратегическим государственным интересам, посредством совершенствования межбюджетных отношений и поддержки занятости мигрантов [5].

По мнению А. Г. Вишневого, М. Б. Денисенко и В. В. Елизарова, важными аспектами в функционировании механизма постоянной миграции являются эффективная система отбора кандидатов и планирование общей численности и структуры миграционного потока, а также связанных с ним интеграционных программ [6]. С целью повы-

шения эффективности миграционной политики И. А. Кулькова предлагает внедрение процессного подхода к управлению миграционными потоками. К преимуществам данного подхода автор относит возможность проведения оценки результатов деятельности не отдельных министерств и ведомств, а результаты управленческого воздействия в целом. Управление на основе процессного подхода позволяет находить неиспользуемые резервы улучшения миграционной политики [7].

Вместе с тем Ю. Н. Петракова справедливо замечает, что миграционные процессы внутри Беларуси подчинены закономерному процессу урбанизации со значимой ролью сельско-городских перемещений. При этом внутренняя миграция в Беларуси не является массовым явлением, а уровень миграционной подвижности населения ниже, чем во многих развитых странах мира, где внутренняя миграция выступает основным фактором выравнивания социально-экономического развития регионов. Под влиянием данного процесса деформировалась структура населения, значительно сократился демовоспроизводственный потенциал и образовался дефицит рабочей силы в сельской местности [8]. В свою очередь, российские ученые Н. П. Тихомиров и Т. М. Тихомирова на основе оценки пятилетнего предельного темпа роста населения России и всех ее административных субъектов за 1995–2019 гг. приходят к выводу, что основным условием роста численности населения в текущем периоде является повышение уровня жизни населения [9]. А. Уметова в исследовании, посвященном сравнению миграционной политики в Кыргызстане и Польше, отмечает, что вопросы внутренней миграции населения из регионов страны не нашли своего отражения в миграционной политике указанных стран. Однако подчеркивается, что внутренний отток населения создает социальные проблемы, которые имеют долгосрочные последствия: нагрузка на центральные города и необходимость их расширения, формирование неконтролируемых потоков населения по территории страны, депопуляция периферийных регионов и проблемы адаптации внутренних мигрантов на новых территориях [10].

Фактически относительно демографической и миграционной политики, а также перспектив возможного развития регионов с негативной демографической динамикой сложились две диаметрально противоположные позиции. Первая позиция (подход) предполагает активное участие государства в регулировании демографических процессов. Сторонники подхода исходят из признания возможности прямого и непосредственного воздействия на демографические тенденции. Кроме того, отмечается необходимость такого вмешательства ввиду того, что сохранение демографического потенциала выступает фундаментальной ценностью и целью для любого государства. Для преломления негативных демографических тенденций на региональном уровне применяются, в частности, инструменты избирательной инвестиционной политики, стимулирование развития отдельных сфер экономики, осуществление масштабной финансовой поддержки. Вторая позиция базируется на необратимости существующих демографических тенденций и, следовательно, отсутствии необходимости в проведении территориально дифференцированной политики по созданию благоприятных и льготных условий для отдельных регионов. Естественный ход развития определяет поляризацию регионов на те, которые привлекают население, и те, которые обречены на постоянную и устойчивую убыль населения. В таком случае миграционная политика направлена на стимулирование миграции из депрессивных регионов с одновременной реализацией градостроительных мер, нацеленных на обеспечение дополнительного роста численности населения в центрах развития [11–13].

Информационную базу исследования составили статистические данные о численности населения административно-территориальных районов и областей по результатам переписей 1989, 1999, 2009 и 2019 гг., данные о благоустройстве жилищного фонда, по данным переписи населения 2019 г., а также данные о ежегодном числе родив-

шихся и умерших на основе данных текущего учета, числе учреждений образований и численности обучающихся за период 1989–2019 гг., номинальной начисленной средней заработной плате за 2019 г. [14–17].

Результаты исследования и их обсуждение

Разработка конкретных направлений и практических рекомендаций по совершенствованию миграционной и демографической политики в первую очередь лежит в выборе на государственном уровне стратегии регионального социально-экономического развития. В целом можно выделить две стратегии регионального развития – политика поддерживающего развития и политика свободного развития (рисунок 1). Реализация политики свободного развития предполагает путь самостоятельного, конкурентного развития регионов с минимальным участием в финансировании региональных проектов из государственного бюджета. Это означает, что перспективы социально-экономического и демографического развития отдельных административно-территориальных единиц должны определяться возможностями местного бюджета и совокупностью конкурентных преимуществ для осуществления тех или иных видов экономической деятельности. Последнее обстоятельство предопределяет интерес к региону со стороны субъектов хозяйствования и его инвестиционную привлекательность. При всей простоте данной стратегии она характеризуется значительным отрицательным эффектом, заключающимся в существенных рисках потери человеческого капитала большинства регионов за счет его перетока в более успешные с точки зрения социально-экономического развития регионы. Помимо демографических потерь, выбор такой стратегии чреват утратой локальной идентичности и историко-культурного наследия отдельных регионов. Кроме того, ее реализация фактически означает выведение из хозяйственного оборота производственной и социальной инфраструктуры, созданной предыдущими поколениями в предшествующие годы.

Стратегия поддерживающего развития, в свою очередь, ориентирована на реализацию ряда мер по повышению конкурентоспособности регионов и повышению их привлекательности для проживания и инвестирования. Предпочтительность данной стратегии обусловлена необходимостью сохранения национального достояния, включающего отдельные региональные элементы (традиции, культура, социально-экономический потенциал). Большая часть административно-территориальных районов по своему социально-экономическому потенциалу и конкурентоспособности уступают как г. Минску, так и областным центрам – городам областного подчинения и минской группе районов.

Для районов, в которых наблюдается устойчивый миграционный отток населения, требуется реализация комплекса разнообразных мер, направленных в общем случае на повышение качества жизни и улучшение экономической ситуации в этих регионах. Социально-экономические меры включают создание рабочих мест, расширение доступа к образованию, обеспечение доступности медицинских услуг, создание инфраструктуры для привлечения инвестиций, а также социальную поддержку населения. Культурно-исторические меры предполагают сохранение и развитие культурного наследия региона, поддержку традиционных ремесел и промыслов, а также создание условий для развития туризма. Экологические меры ориентированы на поддержку экологически чистых видов экономической деятельности и развитие экотуризма, создание экологических парков и заповедников, а также проведение работ по рекультивации территорий. Развитие новых технологий и инновационных видов экономической деятельности, поддержка стартапов и малого бизнеса, создание научных центров и «инкубаторов», а также проведение квалификационных курсов и мастер-классов для местного населения выступают элементами инновационных мер.

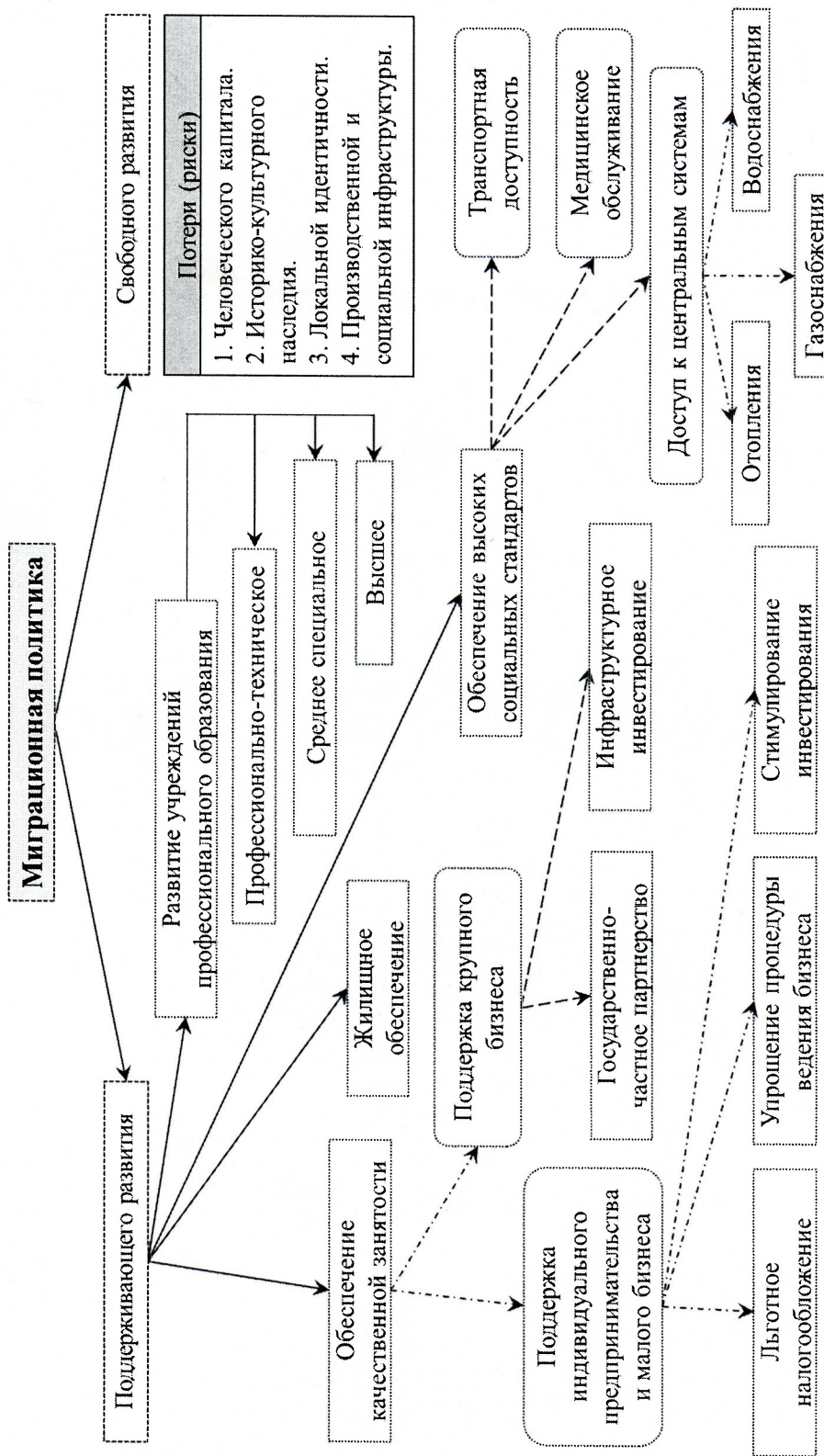


Рисунок 1 – Концептуальная схема миграционной политики Беларуси в условиях неблагоприятных демографических тенденций

Исходя из отличий демографического и социально-экономического потенциалов, стратегия (политика) поддерживающего развития предполагает реализацию мер по нескольким направлениям – развитие учреждений профессионального образования, обеспечение высоких социальных стандартов, жилищное обеспечение, стимулирование качественной занятости.

Для научного обоснования направлений совершенствования демографической политики необходимо учитывать не только географические особенности миграционных потоков, но и связь между преобладающими миграционными установками и структурой региональной экономики, определяющей устойчивость местных рынков труда. Так, большая часть миграционных перемещений городских жителей направлена за пределы областей предыдущего места жительства (52,4–61,6 %), а межрайонные переезды в пределах области преобладают над межобластными лишь в Витебской (43,4 %) и Гомельской (47,8 %) областях, в которых, помимо областных центров, имеются экономические центры с потенциалом роста и конкурентоспособной структурой экономики. Так, в Витебской области центрами экономического развития выступают города Новополоцк и Полоцк. В то же время в Гомельской области к числу таких центров относятся Жлобин и Мозырь. В целом подобные региональные экономические центры служат дополнительными точками притяжения населения в соответствующих областях. Относительно высокий уровень жизни привлекает в первую очередь население из близлежащих районов.

Поскольку в жизненном цикле человека основной этап представлен трудовой деятельностью, то возможностям занятости в широком плане принадлежит преобладающая роль в миграционных предпочтениях. Именно она выступает источником средств к существованию и саморазвития. При оценке занятости следует учитывать предлагаемый уровень оплаты труда и спектр доступных сфер его приложения. Кроме того, альтернативой трудовой занятости выступает индивидуальное предпринимательство и деятельность в качестве самозанятых (ремесленники, физические лица – субъекты агротуризма, плательщики единого налога), а также занятость в качестве учредителей коммерческих организаций в различных организационно-правовых формах (ООО, ЧУП, ОАО и др.).

Существенное влияние уровня заработной платы как отражения качественной занятости на миграционное поведение подтверждается установлением корреляционной связи. Значение коэффициента корреляции между интенсивностью миграционного оттока за период 2009–2019 гг. и номинальной среднемесячной заработной платой за 2019 г. указывает на наличие средней степени связи – 0,52.

Этот же тезис подтверждается тем, что из 26 районов и городов областного подчинения, в которых за 2010-е гг. наблюдался миграционный прирост населения, только пять не входят в группу 50 административно-территориальных единиц с наибольшим уровнем номинальной начисленной среднемесячной заработной платы. Среди же 26 районов Беларуси с наибольшим миграционным оттоком населения только три района (Барановичский, Каменецкий и Чашникский) по размеру среднемесячной заработной платы входят в т. н. топ-50. При этом между районами с самым низким (Мстиславский и Шарковщинский – 689 и 672 руб.) и самым высоким размером заработной платы (Солигорский – 1 602 руб.) имеет место более чем двухкратный разрыв. Более того, в 95 районах и двух городах областного подчинения (Бобруйск и Пинск) среднемесячная заработная плата за 2019 г. не превышала 900 руб.

Более широкими возможностями для трудоустройства как в отношении спектра сфер приложения труда, так и в отношении разнообразия предлагаемых уровней оплаты труда и выбора наиболее приемлемых его условий за счет эффекта масштаба обладают городские поселения. Кроме того, большая численность населения, присущая

именно городам, служит благоприятным фактором для организации частного предпринимательства в различных организационно-правовых формах – от индивидуального предпринимательства до акционерных обществ.

Стимулирование экономической активности возможно посредством внедрения льготных режимов налогообложения, применяемых в отношении субъектов хозяйствования, зарегистрированных в определенной группе территорий или осуществляющих хозяйственную деятельность в их пределах, а также за счет стимулирования притока инвестиций на соответствующие территории с правом на таможенные преференции при ввозе объектов основных средств, отменой на определенный период налоговых выплат с получаемых доходов, снижением ставок по отчислениям в Фонд социальной защиты населения Министерства труда и социальной защиты населения Республики Беларусь. Льготное налогообложение должно затрагивать только тот перечень налоговых выплат, которые перераспределяются в пользу бюджетов областного и республиканского уровней. Кроме того, в менее конкурентоспособных регионах за счет государственного бюджета должно осуществляться инфраструктурное инвестирование для подготовки производственных площадок, проведения инженерных коммуникаций, транспортных сетей. Перспективным направлением активизации региональной экономической деятельности выступает развитие такой кооперации, как государственно-частное партнерство. Участие государства в софинансировании реализации бизнес-проектов в качестве соучредителя субъектов хозяйствования позволяет снизить бремя предпринимательского риска для потенциальных частных инвесторов.

Необходимость обеспечения высоких социальных стандартов, равно как и жилищное обеспечение, в большинстве административно-территориальных районах обусловлена существенным разрывом в комфортности проживания и доступности благ по сравнению с крупнейшими регионами страны. Возможность приобретения собственного жилья выступает существенным конкурентным преимуществом, поскольку является крупнейшей статьёй расходов на протяжении всего жизненного цикла человека. Оценить актуальность государственной поддержки приобретения жилья позволяет, например, сравнение стоимости жилья средних потребительских качеств и средней номинальной начисленной заработной платы. Среди важнейших социальных стандартов следует отметить необходимость выравнивания следующих позиций:

1) уровня доступности медицинского обслуживания, в частности наличия специализированного медицинского оборудования и организации приема у узкопрофильных специалистов;

2) обеспечения транспортной доступности, особенно в сельских населенных пунктах, что дает возможность в наибольшей степени иметь доступ к социально-культурным объектам, объектам развлечений и досуга, возможности трудоустройства с минимизацией транспортных расходов;

3) доступа к центральным системам благоустройства жилья, включая круглосуточное наличие горячего водоснабжения, отопления, газоснабжения.

Городская местность в сравнении с сельской имеет в качестве одного из преимуществ более развитую медико-социальную и культурно-досуговую инфраструктуру. В первом случае обеспечиваются большие возможности для своевременного диагностирования и лечения различного рода заболеваний, в т. ч. относящихся к категории основных причин смертности населения. Организация высококачественной и своевременной медицинской помощи является одной из приоритетных задач демографической политики, решение которой позволяет минимизировать социально контролируемые предотвратимые причины смертности. Во втором случае создаются благоприятные условия для организации полезного времяпрепровождения, носящего как развлекательный, так и познавательно-воспитательный характер. Организация полезного досуга

способствует вытеснению опасных форм времяпрепровождения и снижению распространения вредных привычек.

При разработке мер по совершенствованию демографической политики необходимо учитывать и территориальный разрыв между местом проживания и местом трудоустройства. Установлено, что 25,5 % сельского населения, занятого в экономике, имеют основное место работы за пределами места проживания против 9,8 % городского населения. Это объясняется меньшим числом и разнообразием мест и сфер приложения труда в сельской местности. В то же время за почти десятилетний период 2009–2019 гг. увеличилась доля сельских жителей и снизилась доля городского населения, работающего в месте проживания. В этой связи развитие регулярной маршрутной транспортной сети позволяет нивелировать дисбаланс между местом проживания и наличием рабочих мест.

Анализ благоустроенности жилья по регионам Беларуси свидетельствует о достаточно широком отсутствии элементов благоустройства в разрезе отдельных административно-территориальных районов. В таблице показано число районов, в которых отдельные элементы благоустройства жилья отсутствуют не менее чем в 1/5 домохозяйств региона. Особенно низкая комфортность жилья отмечается в Витебской и Могилевской областях, в которых только в единичных случаях удельный вес домохозяйств с отсутствующими элементами благоустройства не превышает 20 %. В Шарковщинском, Бешенковичском и Миорском районах Витебской области водопровод отсутствует в 37–48 % домохозяйств. В этих же районах наблюдается и самый низкий уровень обеспеченности центральной либо локальной канализацией – 46–53 %. Более того, в восьми районах Беларуси более 50 % домохозяйств вовсе не имеют ни ванны, ни душа, наибольшее значение в Шарковщинском районе – 62 %. Наибольший удельный вес домохозяйств с отсутствующим горячим водоснабжением наблюдается в Шарковщинском, Бобруйском и Краснопольском районах – 59, 53 и 52 % соответственно. По результатам переписи населения 2019 г. выявлено отсутствие отопления вовсе либо наличие только печного отопления в более чем 1/2 домохозяйств в Лельчицком (56 %), Шарковщинском (55 %), Лоевском (52 %) и Россонском (52 %) районах.

Таблица – Число районов Беларуси в разрезе областей с низким уровнем обеспеченности элементами благоустройства жилья, 2019 г.

Область	Число районов	Число районов с удельным весом домохозяйств с отсутствующими элементами благоустройства жилья 20 % и более				
		Водопровод	Канализация	Ванна/душ	Горячее водоснабжение	Отопление
Брестская	16	4	7	13	11	12
Витебская	21	16	18	19	19	19
Гомельская	21	8	12	17	16	15
Гродненская	17	11	13	14	14	14
Минская	22	7	13	16	13	11
Могилевская	21	16	19	21	20	19

На уровне отдельных административно-территориальных районов и населенных пунктов (как городских, так и сельских) дополнительным фактором стабилизации или смягчения демографической ситуации выступает наличие в их пределах учреждений профессионального образования, обеспечивающих реализацию образовательных программ на уровне профессионально-технического, среднего специального или высшего образования. Как правило, такие учреждения размещаются в городских поселениях. Роль учреждений профессионального образования сводится как к созданию допол-

нительных рабочих мест для трудоспособного населения, так и к закреплению местной молодежи на период обучения и даже привлечению обучающихся из других регионов. Это один из ключевых факторов повышения миграционной привлекательности территорий [18–20]. Основной закономерностью территориального распределения учреждений образования и численности обучающихся является их преобладающая концентрация в г. Минске, а в пределах областей – в областных центрах.

Пространственно-временной анализ развития системы профессионального образования свидетельствует об усилении региональной поляризации, что проявляется в усилении роли г. Минска. За период 1989–2019 гг. в Беларуси установился нисходящий тренд развития профессионально-технического образования. Вместе с тем интенсивно развивались система среднего специального и высшего образования. В первом случае масштабы снижения числа учреждений и численности обучающихся в столице были менее значительными, чем в других регионах, во втором – аналогичные показатели развития высшего образования в Минске демонстрировали опережающий рост. Так, за 1989–2019 гг. число учреждений профессионально-технического образования в Беларуси сократилось на 73 организации, или на 29 % от их общего числа. Если в Брестской области и в г. Минске число таких учреждений уменьшилось на 15 и 21 % соответственно, то в Витебской и Минской областях – на 40 и 44 %. За период 1989–2019 гг. уменьшение роли профессионально-технического образования иллюстрируется почти двукратным снижением числа обучающихся в расчете на 1 000 жителей – с 14 до 7.

Число учреждений среднего специального образования за 30-летний период выросло на 79, достигнув отметки в 224 заведения [15]. При этом наибольший прирост отмечен в г. Минске – 22 заведения, что соответствует относительному приросту в 85 %. В других регионах прирост составил от 38 % в Витебской до 68 % в Могилевской области. Однако тенденция уменьшения числа обучающихся имела место и в отношении учреждений среднего специального образования. За весь анализируемый период сокращение составило около 1/4, с наиболее интенсивным снижением в Витебской (38,0 %) и Могилевской (38,9 %) областях. Однако ключевой регион в обеспечении среднего специального образования – г. Минск – не только не потерял число обучающихся, но и незначительно прирос (3,3 %). В столице в 2019/2020 учебном году обучалось 31,3 тыс. человек, т. е. почти каждый четвертый получающий среднее специальное образование.

Стремительный рост характерен для высшего образования. В 1989 г. в Беларуси функционировало 33 учреждения высшего образования, в 2019 г. – 51 учреждение высшего образования (в 2023 г. – 50). В целом территориальное распределение учреждений высшего образования отличается безусловным доминированием столицы. В настоящее время в г. Минске образовательные программы высшего образования реализуются в 27 учреждениях высшего образования, что составляет более половины таких учреждений страны. Сравнение региональной динамики числа учреждений высшего образования за период 1989–2019 гг. позволяет констатировать, что увеличение их числа на 3/4 произошло за счет столицы, в которой было создано 14 учреждений соответствующего уровня (без учета ранее ликвидированных). За этот период были созданы также университеты в г. Барановичи (БарГУ, 2004 г.) и г. Пинске (ПолесГУ, 2006 г.) Брестской области, в г. Гомеле (ГомГМУ, 1990 г.), в г. Могилеве (Могилевский институт МВД, 2010 г.). На г. Минск приходится около 55 % студентов Беларуси. За указанный период в целом в Беларуси число студентов увеличилось на 38 %. Наибольший же прирост отмечен в Брестской и Гродненской областях – 88 и 82 % соответственно. Именно эти два региона отличались наименьшим вкладом в обеспечение населения услугами высшего образования. Однако несмотря на такой существенный прирост числа студентов, удельный вес западных областей в географической структуре студентов остается минимальным – 7,3 и 7,9 %.

Таким образом, даже по суммарному числу обучающихся в учреждениях профессионального образования последние позиции занимают Брестская и Минская области (рисунок 2). И если в отношении центральной области это объясняется отдельным рассмотрением г. Минска как областного центра, то в Брестской области такое положение обусловлено исключительно менее развитой сетью таких учреждений и меньшим общим набором абитуриентов.

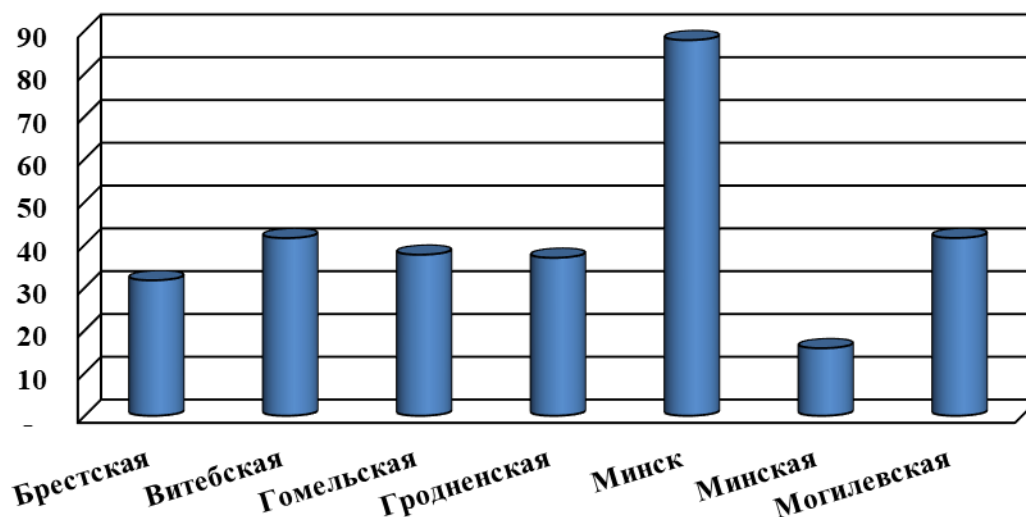


Рисунок 2 – Численность обучающихся в учреждения профессионального образования Беларуси в расчете на 1 000 жителей областей и г. Минска

При прочих равных условиях в рамках оптимизации сети учреждений профессионально-технического, среднего специального и высшего образования приоритет в сохранении образовательных организаций должен оставаться за теми учреждениями, которые расположены в небольших по численности населения районах, как правило, с центрами в городских поселениях с численностью населения до 100 тыс. человек. Среди последних наиболее актуальным сохранение функционирующих учреждений профессионального образования представляется в отношении районов с центрами в малых городских поселениях.

Заключение

Таким образом, наиболее приемлемой стратегией миграционной политики выступает стратегия поддерживающего развития, позволяющая обеспечить устойчивое демографическое развитие, сохранить национальную идентичность и историко-культурное наследие. В рамках данной стратегии предполагается реализация ряда мер по стабилизации миграционной ситуации в регионах Беларуси, включающих развитие системы профессионального образования, повышение комфортности проживания и обеспечение качественной занятости населения.

Эффективная реализация указанной системы мер позволяет значительно смягчить демографическую ситуацию на уровне административно-территориальных районов Беларуси посредством минимизации миграционных установок на выезд из регионов, а также создания условий и стимулов для возвращения на прежнее место проживания после окончания обучения либо прохождения срочной военной службы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорович, А. А. Демографическая трансформация рынка труда Беларуси: региональные тенденции, угрозы и пути их преодоления : монография / А. А. Сидорович ; Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2021. – 193 с.
2. Сидорович, А. А. Факторы динамики мужского трудоспособного населения Беларуси / А. А. Сидорович // Вес. БДПУ. Сер. 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Геаграфія. Біялогія. – 2018. – № 1. – С. 43–50.
3. Сидорович, А. А. Миграционная обстановка в регионах Беларуси по данным смежных переписей 1989–2019 гг. / А. А. Сидорович // Весн. Брэсц. ун-та, Сер. 5. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2022. – № 1. – С. 78–88.
4. Кваша, А. Я. Демографическая политика в СССР : монография / А. Я. Кваша. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 200 с.
5. Прыткова, Ю. И. Подходы к формированию и реализации современной миграционной политики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/13/1098> // Ю. И. Прыткова // Молодой ученый. – 2010. – № 1–2 (13), т. 2. – С. 173–175. – Дата доступа: 19.04.2023.
6. Вишневский, А. Г. Приоритеты демографической и миграционной политики России / А. Г. Вишневский, М. Б. Денисенко, В. В. Елизаров. – М. : РЕЦЭП, 2007. – 226 с. – (Докл. РЕЦЭП ; № 14).
7. Кулькова, И. А. Применение процессного подхода к управлению миграционными потоками в России / И. А. Кулькова // Вестн. ВГУ. Сер.: Экономика и упр. – 2018. – № 1. – С. 155–160.
8. Петракова, Ю. Н. Миграция в Беларуси / Ю. Н. Петракова // Основные вызовы демографической безопасности: сходства и различия в Молдове и Беларуси : монография. – Кишинев : Штиинца, 2010. – С. 246–270.
9. Тихомиров, Н. П. Методы обоснования стратегий преодоления демографического кризиса в регионах России / Н. П. Тихомиров, Т. М. Тихомирова // Фундам. исслед. – 2020. – № 5. – С. 160–166.
10. Уметова, А. Подходы к разработке миграционной политики в странах Центральной Азии и Европы [Электронный ресурс] : анализ. ст. партнеров проекта «Открываем двери подготовке политики: Средняя Азия и Южный Кавказ» Фонда Демократии ООН № UDF-GLO-09-281 / А. Уметова. – Прага : ПАСОС – Ассоциация для поддержки открытого общества, 2012. – Режим доступа: https://www.auca.kg/uploads/Migration_Database/Publications/Umetova,%20migration%20policy%20paper,%20Russ.pdf. – Дата доступа: 19.04.2023.
11. Ефремова, В. А. Отечественный и зарубежный опыт изучения городов, теряющих население: тематика, методы и центры исследований / В. А. Ефремова // Регион. исслед. – 2015. – № 3. – С. 86–98.
12. Государственная политика вывода России из демографического кризиса : монография / В. И. Якунин [и др.] ; под ред. С. С. Сулакшина. – 2-е изд. – М. : Науч. эксперт, 2007. – 888 с.
13. Глушкова, В. Г. Управление демографическим развитием России: региональный аспект / В. Г. Глушкова, О. Б. Хорева // Регион. исслед. – 2013. – № 1 (39). – С. 68–73.
14. Интерактивная информационно-аналитическая система «Итоговые данные переписей населения Республики Беларусь» [Электронный ресурс] / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://census.belstat.gov.by/sections>. – Дата доступа: 14.03.2023.
15. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс] / Нац. стат. ком. Респ.

Беларусь. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Search>. – Дата доступа: 14.03.2023.

16. Общая численность населения, численность населения по возрасту и полу, состоянию в браке, уровню образования, национальностям, языку, источникам средств к существованию по Республике Беларусь, 2019 : стат. бюл. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2020. – 55 с.

17. Перепись населения, 2009 : в 7 т. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь; редкол.: В. И. Зиновский (пред.) [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2010–2011. – Т. 2. : Население Республики Беларусь: его численность и состав, 2010. – 414 с.

18. О типовых штатах и нормативах численности работников учреждений высшего образования [Электронный ресурс] : постановление М-ва образования Респ. Беларусь, 11 авг. 2022 г., № 252 // Эталон. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.

19. О типовых штатах и нормативах численности работников учреждений профессионально-технического образования [Электронный ресурс] : постановление М-ва образования Респ. Беларусь, 25 мая 2015 г., № 43 // Эталон. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.

20. О типовых штатах и нормативах численности работников учреждений среднего специального образования [Электронный ресурс] : постановление М-ва образования Респ. Беларусь, 11 авг. 2022 г., № 251 // Эталон. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.

REFERENCES

1. Sidorovich, A. A. Demografichieskaja transformacija rynka truda Bielarusi: rieional'nyje tendencii, ugrozy i puti ikh prieodolienija : monografija / A. A. Sidorovich ; Briest. gos. un-t im. A. S. Pushkina. – Briest : BrGU, 2021. – 193 s.

2. Sidorovich, A. A. Faktory dinamiki muzhskogo trudosposobnogo nasielienija Bielarusi / A. A. Sidorovich // Vies. BDPU. Sier. 3, Fizika. Matematyka. Infarmatyka. Hieahrafija. Bijalohija. – 2018. – № 1. – S. 43–50.

3. Sidorovich, A. A. Migracionnaja obstanovka v rieionakh Bielarusi po dannym smiezhnykh pieriepisiej 1989–2019 gg. / A. A. Sidorovich // Viesn. Bresc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2022. – № 1. – S. 78–88.

4. Kvasha, A. Ya. Demografichieskaja politika v SSSR : monografija / A. Ya. Kvasha. – M. : Finansy i statistika, 1981. – 200 s.

5. Prytkova, U. I. Podkhody k formirovaniju i rializacii sovriemiennoj migracionnoj politiki [Molodoj uchionyj] / U. I. Prytkova // Molodoj uchionyj. – 2010. – № 1–2 (13), t. 2. – S. 173–175. – Riezhim dostupa: <https://moluch.ru/archive/13/1098/>. – Data dostupa: 19.04.2023.

6. Vishnievskij, A. G. Prioritiety demografichieskoj i migracionnoj politiki Rossii / A. G. Vishnievskij, M. B. Dienisienko, V. V. Elizarov. – M. : RECEP, 2007. – 226 s. – (Doklady RECEP ; № 14).

7. Kul'kova, I. A. Primienienije processnogo podkhoda k upravlieniju migracionnymi potokami v Rossii / I. A. Kul'kova // Viest. VGU. Sier.: Ekonomika i upr. – 2018. – № 1. – S. 155–160.

8. Pietrakova, U. N. Migracija v Bielarusi / U. N. Pietrakova // Osnovnyje vyzovy demografichieskoj bieзопасnosti: skhodstva i razlichija v Moldovie i Bielarusi : monografija. – Kishiniov : Shtiinca, 2010. – S. 246–270.

9. Tikhomirov, N. P. Mietody obosnovanija stratieгий prieodolienija demografichieskogo krizisa v rieionakh Rossii / N. P. Tikhomirov, T. M. Tikhomirova // Fundam. isslied. – 2020. – № 5. – S. 160–166.

10. Umetova, A. Podkhody k razrabotkie migracionnoj politiki v stranakh Central'noj Azii i Jvropy [Elektronnyj riesurs] : analit. st. partniorov projekta «Otkryvaja dvieri podgotovkie politiki: Sredniaja Azija i Juzhnyj Kavkaz» Fonda Demokratii OON № UDF-GLO-09-281 / A. Umetova. – Praga : PASOS – Asociacija dlja poddierzhki otkrytogo obshchestva, 2012. – Riezhim dostupa: https://www.auca.kg/uploads/Migration_Database/Publications/Umetova,%20migration%20policy%20paper,%20Russ.pdf. – Data dostupa: 19.04.2023.
11. Yefriemova, V. A. Otiechiestviennyj i zarubiezhnyj opyt izuchienija gorodov, tie-riajushchikh nasielienije: tiematika, mietody i centry issliedovaniy / V. A. Yefriemova // Riegiion. isslied. – 2015. – № 3. – S. 86–98.
12. Gosudarstviennaja politika vyvoda Rossii iz diemografichieskogo krizisa : monografija / V. I. Yakunin [i dr.] ; pod ried. S. S. Sulakshina. – 2-je izd. – M. : Nauch. ekspiert, 2007. – 888 s.
13. Glushkova, V. G. Upravlienije diemografichieskim razvitijem Rossii: riegiional'nyj aspiekt / V. G. Glushkova, O. B. Khorieva // Riegiion. isslied. – 2013. – № 1 (39). – S. 68–73.
14. Interaktivnaja informacionno-analitichieskaja sistiema «Itogovyje dannyje pieriepisiej nasielienija Riespubliki Bielarus'» [Elektronnyj riesurs] / Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus'. – Riezhim dostupa: <https://census.belstat.gov.by/sections>. – Data dostupa: 14.13.2023.
15. Interaktivnaja informacionno-analitichieskaja sistiema rasprostranienija oficial'noj statistichieskoj informacii [Elektronnyj riesurs] / Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus'. – Riezhim dostupa: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Search>. – Data dostupa: 14.13.2023.
16. Obshchaja chisliennost' nasielienija, chisliennost' nasielienija po vozrastu i polu, sostojaniju v brakie, urovnju obrazovanija, nacional'nostiam, jazyku, istochnikam sriedstv k sushiestvovaniju po Riespublikie Bielarus', 2019 : stat. biul. / Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus'. – Minsk : Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus', 2020. – 55 s.
17. Pieriepis' nasielienija, 2009 : v 7 t. / Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus' ; riedkol.: V. I. Zinovskij (pried.) [i dr.]. – Minsk : Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus', 2010–2011. – T. 2 : Nasielienije Riespubliki Bielarus': jego chisliennost' i sostav, 2010. – 414 s.
18. O tipovykh shtatakh i normativakh chisliennosti rabotnikov uchriezhdienij vyshego obrazovanija [Elektronnyj riesurs] : postanovlienije M-va obrazovanija Riesp. Bielarus', 11 avg. 2022 g., № 252 // Etalon. Zakonodatiel'stvo Riespubliki Bielarus' / Nac. centr pravovoj inform. Riesp. Bielarus'. – Minsk, 2023.
19. O tipovykh shtatakh i normativakh chisliennosti rabotnikov uchriezhdienij profesional'no-tiekhnichieskogo obrazovanija [Elektronnyj riesurs] : postanovlienije M-va obrazovanija Riesp. Bielarus', 25 maja 2015 g., № 43 // Etalon. Zakonodatiel'stvo Riespubliki Bielarus' / Nac. centr pravovoj inform. Riesp. Bielarus'. – Minsk, 2023.
20. O tipovykh shtatakh i normativakh chisliennosti rabotnikov uchriezhdienij sriedniego spiecial'nogo obrazovanija [Elektronnyj riesurs] : postanovlienije M-va obrazovanija Riesp. Bielarus', 11 avg. 2022 g., № 251 // Etalon. Zakonodatiel'stvo Riespubliki Bielarus' / Nac. centr pravovoj inform. Riesp. Bielarus'. – Minsk, 2023.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 04.05.2023

Да ведама аўтараў

Рэдкалегія часопіса разглядае рукапісы толькі тых артыкулаў, якія адпавядаюць навуковаму профілю выдання, нідзе не апублікаваныя і не перададзеныя ў іншыя рэдакцыі.

Матэрыялы прадстаўляюцца на беларускай, рускай ці англійскай мове ў адным экзэмпляры аб'ёмам ад 0,35 да 0,5 друкаванага аркуша (не меней за 14 000 знакаў), у электронным варыянце – у фармаце Microsoft Word for Windows (*.doc, *.docx ці *.rtf) і павінны быць аформлены ў адпаведнасці з наступнымі патрабаваннямі:

- папера фармату А4 (21×29,7 см);
- палі: зверху – 2,8 см, справа, знізу, злева – 2,5 см;
- шрыфт – гарнітура Times New Roman;
- кегль – 12 pt.;
- міжрадковы інтэрвал – адзінарны;
- двукоссе парнае «...»;
- абзац: водступ першага радка 1,25 см;
- выраўноўванне тэксту па шырыні.

Максімальныя лінейныя памеры табліц і малюнкаў не павінны перавышаць 15×23 або 23×15 см. Усе графічныя аб'екты, якія ўваходзяць у склад аднаго малюнка, павінны быць згрупаваны паміж сабой. Усе малюнкi і фотаздымкі павінны быць толькі ў чорна-белым выкананні. Размернасць усіх велічынь, якія выкарыстоўваюцца ў тэксце, павінна адпавядаць Міжнароднай сістэме адзінак вымярэння (СВ). Пажадана пазбягаць скарачэнняў слоў, акрамя агульнапрынятых. Спіс літаратуры павінен быць аформлены паводле Узораў афармлення бібліяграфічнага апісання ў спісе крыніц, якія прыводзяцца ў дысертацыі і аўтарэфераце, зацверджаных загадам Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 25.06.2014 № 159 (у рэдакцыі загада ад 08.09.2016 № 206). Спасылкі на крыніцы ў артыкуле нумаруюцца адпаведна парадку цытавання. Парадкавыя нумары спасылак падаюцца ў квадратных дужках ([1–4], [1; 3], [1, с. 32], [2, с. 52–54], [3, л. 5], [4, л. боб.]). Не дапускаецца выкарыстанне канцавых зносака.

Матэрыял уключае наступныя элементы па парадку:

- індэкс УДК;
- імя, імя па бацьку, прозвішча аўтара/аўтараў (аўтараў не больш, чым 5) на мове артыкула;
- звесткі пра аўтара/аўтараў (навуковая ступень, званне, пасада, месца працы/вучобы) на мове артыкула;
- імя, імя па бацьку, прозвішча аўтара/аўтараў на англійскай мове;
- звесткі пра аўтара/аўтараў на англійскай мове;
- e-mail аўтара/аўтараў;
- назва артыкула на мове артыкула;
- анатацыя ў аб'ёме 100–150 слоў і ключавыя словы на мове артыкула (курсіў, кегль – 10 pt.);
- назва артыкула на англійскай мове;
- анатацыя і ключавыя словы на англійскай мове.

Звесткі аб навуковым кіраўніку (для аспірантаў і саіскальнікаў) указваюцца на першай старонцы ўнізе.

Асноўны тэкст структуравецца ў адпаведнасці з патрабаваннямі Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь да навуковых артыкулаў, якія друкуюцца ў выданнях, уключаных у Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў:

- Уводзіны (пастаноўка мэты і задач даследавання).
- Асноўная частка (матэрыялы і метады даследавання; вынікі і іх абмеркаванне).
- Заклучэнне (фармулююцца асноўныя вынікі даследавання, указваецца іх навізна, магчымасці выкарыстання).
- Спіс выкарыстанай літаратуры; спіс літаратуры павінен уключаць не больш за 20–22 крыніцы і абавязкова ўтрымліваць публікацыі, у тым ліку замежныя, па тэме даследавання за апошнія 10 гадоў.
- References – спіс выкарыстанай літаратуры, які прадубліраваны лацінскім алфавітам (колькасць крыніц, прыведзеных у спісе і ў References, павінна супадаць).

Да рукапісу артыкула абавязкова дадаюцца:

- выліска з пратакола пасяджэння кафедры, навуковай лабараторыі ці ўстановы адукацыі, дзе працуе (вучыцца) аўтар, завераная пячаткаю, з рэкамендацыяй артыкула да друку;
- рэцэнзія знешняга ў адносінах да аўтара профільнага спецыяліста з вучонай ступенню, завераная пячаткаю;
- экспертнае заключэнне (для аспірантаў і дактарантаў).

Усе артыкулы абавязкова праходзяць «сляпое» рэцэнзаванне. Рукапісы, аформленыя не ў адпаведнасці з выкладзенымі правіламі, рэдкалегія не разглядае і не вяртае. Аўтары нясуць адказнасць за змест прадстаўленага матэрыялу.

Рукапіс артыкула і дакументы дасылаць на адрас: 224016, г. Брэст, бульвар Касманаўтаў, 21, рэдакцыя часопіса «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта», электронны варыянт артыкула накіроўваць на e-mail: chemskorp@yandex.ru.

Карэктары *А. А. Іванюк, Л. М. Калілец*

Камп'ютарнае макетаванне *С. М. Мініч, Г. Ю. Пархац*

Падпісана ў друку 19.12.2023. Фармат 60×84/8. Папера афсетная. Гарнітура Таймс. Рызаграфія.

Ум. друк. арк. 16,51. Ул.-выд. арк. 11,99. Тыраж 100 экз. Заказ № 425.

Выдавец і паліграфічнае выкананне: УА «Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна».

Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/55 ад 14.10.2013.

ЛП № 02330/454 ад 30.12.2013.

224016, г. Брэст, вул. Міцкевіча, 28.