



Веснік

Брэсцкага ўніверсітэта

Рэдакцыйная калегія

галоўны рэдактар
А. М. Сэндзер

намеснік галоўнага рэдактара
А. Я. Будзько

адказны рэдактар
Н. С. Ступень

І. В. Абрамава (Беларусь)
А. А. Афонін (Расія)
М. А. Багдасараў (Беларусь)
А. М. Вігчанка (Беларусь)
А. А. Волчак (Беларусь)
В. В. Грыгчык (Беларусь)
А. А. Махнач (Беларусь)
А. В. Мацвееў (Беларусь)
В. А. Несцяроўскі (Украіна)
У. У. Салтанаў (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»

№ 1 / 2022

У адпаведнасці з Дадаткам да загада
Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь
ад 01.04.2014 № 94 у рэдакцыі загада Вышэйшай атэстацыйнай
камісіі Рэспублікі Беларусь ад 28.01.2022 № 14
(са змяненнямі, унесенымі загадам ВАК ад 07.02.2022 № 25)
часопіс «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта.

Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі»
ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь
для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў у 2022 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

БІЯЛОГІЯ

Абрамова І. В., Блоцкая Е. С.

Изменение биомассы населения птиц сосняков мшистых
в процессе сукцессии в юго-западной Беларуси 5

Бойко В. И.

Сравнительная характеристика внутренней структуры однолетнего стебля
некоторых древесно-кустарниковых покрытосеменных растений 12

Коваленко В. В.

Влияние эпикастерона и его конъюгатов
на морфометрические и физиолого-биохимические параметры
тимофеевки луговой (PHLEUM PRATENSE L.) 22

Хомич Г. Е.

Функциональный ответ сердца и сосудов на изменение положения тела у людей,
проживающих на загрязненной радионуклидами территории 31

Хомюк Я. В., Колбас А. П., Литвиновская Р. П.

Влияние эфирных масел и их эфиров с серной кислотой
на ростовые параметры и биомассу TRIFOLIUM PRATENSE L. 41

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

Волчек А. А., Сидак С. В.

Вероятностный прогноз стока рек Беларуси в современных условиях 51

Клебанович Н. В., Кислицын Д. А.

Анализ особенностей почвенно-растительного покрова
на основе данных дистанционного зондирования
(на примере ключевых районов Брестского Полесья) 59

Климович О. А.

Геоэкологическая оценка почв поймы реки Мухавец на территории города Бреста 67

Сидорович А. А.

Миграционная обстановка в регионах Беларуси по данным смежных переписей 1989–2019 гг. 78

Трофимчук Д. А.

Оценка уровня развития автобусного пассажирского транспорта в городе Бресте 89



Vesnik

of Brest University

Editorial Board

editor-in-chief
A. M. Sender

deputy editor-in-chief
A. Ya. Budzko

managing editor
N. S. Stupen

I. V. Abramava (Belarus)
A. A. Afonin (Russia)
M. A. Bahdasarau (Belarus)
A. M. Vitshanka (Belarus)
A. A. Volchak (Belarus)
V. V. Hrychyk (Belarus)
A. A. Makhnach (Belarus)
A. V. Matsveyeu (Belarus)
V. A. Nestsyrouski (Ukraine)
V. V. Saltanau (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»

№ 1 / 2022

According to the Supplement to the order of Supreme Certification
Commission of the Republic of Belarus from April 01, 2014 nr 94
as revised by the order of Supreme Certification Commission
of the Republic of Belarus from January 28, 2022 nr 14
(with the amendments made by the order of Supreme Certification
Commission from February 07, 2022 nr 25)
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 2022
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

BIOLOGY

Irina Abramova, Alena Blockaja Dynamics of Bird Population Biomass During the Succession of Mossy Pine Forests in Southwestern Belarus	5
Uladzimir Boika Comparative Characteristics of the Internal Structure of the Annual Stem of Some Woody-Shrubs Omicoseed Plants	12
Viktar Kavalenka Influence of Epicastasterone and its Conjugates on Morphometric and Physiological-Biochemical Parameters of Timothy (PHLEUM PRATENSE L.).....	22
Halina Khomich Functional Response of Heart and Blood Vessels to Changes in Body Position in People Living in a Radionuclide Contaminated Area	31
Yana Khamiuk, Aliaksandr Kolbas, Raisa Litvinovskaya The Effect of Epibrassinolide and its Sulfuric Acid Esters on the Morphometric Parameters and Biomass of TRIFOLIUM PRATENSE L.	41

SCIENCES ABOUT EARTH

Aleksander Volchak, Svetlana Sidak Probabilistic Forecast of River Runoff in Belarus in Modern Conditions	51
Nikolai Klebanovich, Dmitry Kislitsyn Analysis of Soil and Vegetation Cover Features on the Remote Sensing Data (by the Example of the Brest Polesye's Key Districts)	59
Olga Klimovich Geoecological Assessment of Soils in the Floodplain of the Mukhavets River Within the City Limits of Brest	67
Alexandr Sidorovich Migration Situation in Regions of Belarus According to the Data of the Adjacent Censuses 1989–2019	78
Denis Trofimchuk Assessment of the Level Development Bus Passenger Transport in the City of Brest	89

УДК 598.2(476.7)+574.42

Ирина Васильевна Абрамова¹, Елена Степановна Блоцкая²

¹канд. биол. наук, доц., доц. каф. географии и природопользования
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²канд. биол. наук, доц., доц. каф. анатомии, физиологии и безопасности человека
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Irina Abramova¹, Alena Blockaja²

¹PhD in Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Geography and Nature Management
of Brest State A. S. Pushkin University

²PhD in Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Anatomy, Physiology and Human Safety
of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: iva.abramova@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ БИОМАССЫ НАСЕЛЕНИЯ ПТИЦ СОСНЯКОВ МШИСТЫХ В ПРОЦЕССЕ СУКЦЕССИИ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ БЕЛАРУСИ

Пролесжены изменения биомассы населения птиц в процессе восстановительной сукцессии на месте вырубки сосняков мшистых лесов в юго-западной Беларуси. Сбор материалов проводился в 2000–2019 гг. Применялись общепринятые методы учета птиц. Установлены биомасса видов (кг/км²) и межгодовая изменчивость в течение 11 сезонов. По ходу сукцессии (6 стадий, возраст 1–90 лет) видовое разнообразие населения птиц увеличивается от 8 до 42 видов, суммарная биомасса – от 4,15 до 30,71 кг/км². Высокая стабильность биомассы ($CV < 30\%$) на разных стадиях сукцессии присуща для 25,0–41,5 % видов, на стадии спелых сосновых лесов в эту группу входит 17 видов птиц.

Ключевые слова: сукцессия, население птиц, биомасса, сосновые леса, Беларусь.

Dynamics of Bird Population Biomass During the Succession of Mossy Pine Forests in Southwestern Belarus

The article traces changes in bird population biomass in the process of secondary succession of cleared mossy pine forests forest in the south-western Belarus. The study was performed in the years 2000–2019 applying the conventional bird count and statistical processing methods. The biomass of species (kg/km²) and inter-annual variability during 11 seasons were established. The species diversity of birds has been found to increase from 8 to 42 species during the succession (6 stages, age from 1 to 90 years). Total biomass increases from 4,15 to 30,71 kg/km². High stability of biomass ($CV < 30\%$) at different stages of succession is inherent in 25,0–41,5 % of species; at the stage of mature pine forests, this group includes 17 species of birds

Key words: succession, bird communities, biomass, pine forests, Belarus.

Введение

Экологическая преемственность сообществ растений и животных как одна из биоценологических проблем наиболее полно изучена на примере сукцессий лесных экосистем. Сукцессия обычно рассматривается в плоскости организации биоценозов и протекания через них энергии. Признано [1], что экологическая сукцессия является упорядоченным процессом направленного и, следовательно, предсказуемого изменения биоценоза и достигает пика с формированием экосистемы настолько стабильной, насколько это возможно биологически в данных условиях.

Птицы являются достаточно пассивным элементом в сукцессии экосистем, но их участие в формировании биоценозов не может рассматриваться как совершенно

не важное. В целом птицы отличаются широкой экологической пластичностью, но в период размножения их биотопическая привязанность выражена наиболее сильно. С увеличением возраста сукцессии увеличивается «слой» жизни, усложняется вертикальная структура фитоценоза, формируются новые экологические ниши, которыми птицы могут пользоваться в исключительно широком диапазоне. Смена жизненных форм растений, доминирующих на разных стадиях восстановительной сукцессии, вызывает значительные изменения в структуре сообществ птиц, происходит пространственное перераспределение птиц открытых ландшафтов (луговых, полевых, кустарниковых), дендрофильных и опушечных видов.

Исследования, проведенные в разных регионах до настоящего времени, главным образом касаются сукцессии орнитокомплексов с точки зрения количества видов и численности особей, они свидетельствуют о параллельном с сукцессией фитоценозов увеличении разнообразия птиц [2–6]. Особенности структуры орнитокомплексов лесных экосистем на разных стадиях сукцессии лесных экосистем в Беларуси и других регионах изучены недостаточно полно. Целью данной работы было изучение межгодовой динамики биомассы населения птиц и оценка изменчивости биомассы популяций отдельных видов в сосняках мшистых в юго-западной Беларуси.

Материалы и методы

Сбор материалов проводился в 2000–2019 гг. в Брестском (Томашовское, Меднянское и Домачевское лесничества), Малоритском (Пожежинское и Малоритское лесничества) и Ивацевичском (Ивацевичское и Бронногорское лесничества) лесхозах. При изучении орнитокомплексов на разных стадиях сукцессии сосновых лесов на месте вырубок применяли общепринятые методы учета птиц [7; 8]. Учеты проводили на маршрутах, которые были заложены в экосистемах, находящихся на разных стадиях сукцессионного ряда.

В сосняках мшистых нами выделено шесть стадий развития растительности от свежей вырубки до спелого леса 90-летнего возраста: 1–3 года – травянистая растительность лугового типа (свежая лесосека); 4–9 лет – поросль кустарников, березы и осины и молодые культуры сосны; 10–20 лет – сплошные заросли кустарников, поросли и подроста; 30–40 лет – молодняк; 60–70 лет – средневозрастной сосновый лес; 80–90 лет – высокоствольный спелый лес из сосны с примесью березы, дуба и других пород.

Учет птиц в каждом из сообществ, находящихся на разных стадиях сукцессии, проводился в течение 11 сезонов с 15 мая по 15 июня, когда практически все птицы принимают участие в размножении. В этот период орнитокомплексы наиболее стабильны, а виды в это время проявляют максимальное предпочтение к местообитанию. Общая протяженность пройденных маршрутов составила более 500 км.

Данные по биомассе птиц подвергались статистической обработке [9]. Для определения стабильности использовали коэффициент вариации (CV, %) биомассы населения птиц. Латинские названия птиц приведены по сводке *Clements checklist of birds of the world* [10].

Результаты и их обсуждение

Сведения об орнитокомплексах сосновых лесов в юго-западной Беларуси имеются в монографиях [11–13]. Установлено, что в спелых сосновых лесах летом птицы заселяют все ярусы, здесь обитает около 43 видов птиц (из них 36 фоновых), суммарная биомасса составляет 28,04 кг/км², по биомассе доминируют три вида птиц: зяблик, рябчик и обыкновенная кукушка.

В первый же год на местах сплошных рубок резко изменяются микроклимат, видовой состав травянистой растительности и беспозвоночных животных. На свежей лесосеке

нами было учтено 8 видов птиц, суммарная биомасса которых составляет 4,15 кг/км². По биомассе доминируют 5 видов: серая куропатка *Perdix perdix* (1,23 ± 0,16 кг/км²), лесной конек *Anthus trivialis* (0,78 ± 0,05 кг/км²), лесной жаворонок *Lullula arborea* (0,67 ± 0,16 кг/км²), полевой жаворонок *Alauda arvensis* (0,66 ± 0,16 кг/км²) и обыкновенная овсянка *Emberiza citrinella* (0,51 ± 0,16 кг/км²). На долю доминирующих видов в сумме приходится 92,77 % общей биомассы (таблица). У обитающих на свежей вырубке видов отмечен низкий или средний уровень вариации биомассы (CV от 23,08 до 45,52 %). Наибольшая изменчивость показателя на этой стадии сукцессии характерна для серой куропатки, наименьшая – для лесного конька.

На стадии 4–9 лет появляются птицы кустарниковых зарослей: серая славка *Sylvia communis*, обыкновенный жулан *Lanius collurio* и др. Количество видов возрастает до 15, суммарная биомасса – до 5,13 кг/км². Состав доминирующих видов по сравнению с предыдущей стадией не изменяется, их доля в суммарной биомассе снижается и составляет 78,36 %.

На третьей стадии (10–20 лет), как и на предыдущей, отмечено 15 видов птиц. При этом из орнитокомплекса выбывают виды открытых пространств: белая трясогузка *Motacilla alba*, луговой чекан *Saxicola rubetra*, луговой конек, серая куропатка, полевой жаворонок. На смену им приходят дендрофильные птицы: зяблик *Fringilla coelebs*, черноголовая славка *Sylvia atricapilla*, пеночка-весничка *Phylloscopus trochilus*, пеночка-теньковка *Phylloscopus collybita* и пеночка-трещотка *Phylloscopus sibilatrix*. Суммарная биомасса населения птиц по сравнению с предыдущей стадией сукцессии снижается в 1,6 раза и составляет 3,28 кг/км², это объясняется выпадением из орнитокомплекса серой куропатки – вида, который вносил наибольший вклад в данный показатель на предыдущих двух стадиях. Изменяется и состав доминирующих видов, на третьей стадии – это зяблик (0,71 ± 0,04 кг/км²), лесной конек (0,69 ± 0,05 кг/км²), певчий дрозд (0,59 ± 0,06 кг/км²) и обыкновенная овсянка (0,50 ± 0,05 кг/км²), биомасса которых составляет 75,91 % от биомассы птиц этой категории. Более стабильна биомасса у зяблика (18,30 %), пеночки-веснички (25,00 %), пеночки-теньковки (25,00 %) и лесного конька (CV = 26,09 %). Наибольшая изменчивость на этой стадии сукцессии характерна для коноплянки *Linaria cannabina* (0,04 ± 0,01 кг/км², CV = 75,00 %).

На стадии возраста 30–40 лет на месте вырубки развивается сосняк мшистый, в котором доминирует сосна с примесью дуба, березы и других пород. Количество видов птиц возрастает до 24, суммарная биомасса в 1,8 раза превышает показатель предыдущей стадии. В сообществе птиц растет представительство дендрофильных видов, здесь начинают регистрироваться деряба *Turdus viscivorus*, славка-завирушка *Sylvia curruca*, поползень *Sitta europaea*, крапивник *Troglodytes troglodytes*, большая синица *Parus major*, хохлатая синица *Lophophanes cristatus*, буроголовая гаичка *Parus montanus*, серая мухоловка *Muscicapa striata*, мухоловка-пеструшка *Ficedula hypoleuca*, обыкновенная иволга *Oriolus oriolus*, сойка *Garrulus glandarius*, обыкновенный козодой *Caprimulgus europaeus*, большой дятел *Dendrocopos major*, рябчик *Tetrastes bonasia*. Начиная со стадии молодняка перестают встречаться черноголовый щегол *Carduelis carduelis*, коноплянка, обыкновенный жулан, обыкновенная овсянка и серая славка. На этой стадии наибольший вклад в биомассу вносят три вида: зяблик (1,03 ± 0,05 кг/км², CV = 15,53 %), рябчик (0,84 ± 0,10 кг/км², CV = 40,48 %) и сойка (0,63 ± 0,06 кг/км², CV = 31,75 %), на долю которых приходится 44,21 % от суммарной биомассы (5,79 кг/км²). Стабильной является биомасса обыкновенной горихвостки (CV = 16,67 %), буроголовой гаички (23,53 %). Наиболее высокие значения коэффициента вариации отмечены у дерябы (60,87 %) и крапивника (100 %).

Таблица. – Параметры биомассы населения птиц сосняков мшистых на разных стадиях восстановительной сукцессии

Вид	Возраст сукцессии, лет											
	1-3		4-9		10-20		30-40		60-70		80-90	
	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV
<i>Motacilla alba</i>	0,11 ± 0,01	33,36	0,10 ± 0,01	40,00								
<i>Anthus trivialis</i>	0,78 ± 0,05	23,08	0,97 ± 0,05	17,46	0,69 ± 0,05	26,09	0,46 ± 0,04	28,26	1,36 ± 0,07	17,65	1,34 ± 0,06	15,67
<i>Anthus pratensis</i>	0,10 ± 0,01	40,00	0,09 ± 0,01	44,44								
<i>Saxicola rubetra</i>	0,09 ± 0,01	33,33	0,21 ± 1,73	28,57								
<i>Perdix perdix</i>	1,23 ± 0,16	45,52	0,89 ± 0,12	46,07								
<i>Alauda arvensis</i>	0,66 ± 0,06	30,00	0,56 ± 0,05	33,03								
<i>Lullula arborea</i>	0,67 ± 0,05	23,88	0,68 ± 0,05	23,53	0,23 ± 0,03	43,48	0,14 ± 0,02	42,46	0,27 ± 0,03	36,34	0,29 ± 0,03	32,41
<i>Lanius collurio</i>			0,08 ± 0,01	50,00	0,06 ± 0,01	50,00						
<i>Emberiza citrinella</i>	0,51 ± 0,05	33,33	0,92 ± 0,05	20,65	0,50 ± 0,05	36,00						
<i>Phoenicurus phoenicurus</i>			0,04 ± 0,01	50,00	0,04 ± 0,01	50,00	0,02 ± 0,00	16,67	0,06 ± 0,01	33,33	0,09 ± 0,01	33,33
<i>Linaria cannabina</i>			0,08 ± 0,01	37,50	0,04 ± 0,01	75,00						
<i>Carduelis carduelis</i>			0,02 ± 0,02	50,00	0,04 ± 0,01	50,00						
<i>Chloris chloris</i>									0,02 ± 0,01	106,00	0,03 ± 0,01	66,67
<i>Erithacus rubecula</i>			0,09 ± 0,01	23,33	0,21 ± 0,02	33,33	0,30 ± 0,03	33,33	0,51 ± 0,03	21,57	0,52 ± 0,03	17,31
<i>Turdus philomelos</i>			0,35 ± 0,03	31,43	0,59 ± 0,06	33,33	0,50 ± 0,09	36,00	1,20 ± 0,08	23,33	1,30 ± 0,11	29,33
<i>Turdus viscivorus</i>							0,23 ± 0,04	60,87	0,47 ± 0,03	25,53	0,59 ± 0,05	30,51
<i>Turdus pilaris</i>									0,69 ± 0,06	30,43	0,95 ± 0,07	26,32
<i>Regulus regulus</i>									0,03 ± 0,01	33,33	0,02 ± 0,00	58,38
<i>Sylvia communis</i>			0,05 ± 0,01	60,00	0,03 ± 0,01	30,77						
<i>Sylvia atricapilla</i>					0,04 ± 0,01	50,00	0,02 ± 0,01	42,86	0,12 ± 0,01	33,33	0,17 ± 0,02	35,29
<i>Sylvia curruca</i>							0,08 ± 0,01	37,50	0,66 ± 0,01	37,50	0,10 ± 0,01	30,00
<i>Certhia familiaris</i>									0,05 ± 0,01	40,00	0,05 ± 0,01	20,00
<i>Sitta europaea</i>							0,06 ± 0,01	33,33	0,15 ± 0,02	53,33	0,26 ± 0,01	19,05
<i>Troglodytes troglodytes</i>							0,01 ± 0,00	100,00	0,04 ± 0,01	25,00		
<i>Fringilla coelebs</i>					0,71 ± 0,04	18,30	1,03 ± 0,05	15,53	3,36 ± 0,06	6,25	3,38 ± 0,07	7,40
<i>Parus major</i>							0,27 ± 0,02	29,63	0,46 ± 0,02	19,57	0,45 ± 0,02	17,78
<i>Lophophanes cristatus</i>							0,02 ± 0,00	50,00	0,05 ± 0,09	20,00	0,07 ± 0,01	28,57
<i>Poecile montanus</i>							0,17 ± 0,01	23,53	0,47 ± 0,02	17,02	0,48 ± 0,02	16,67
<i>Phylloscopus trochilus</i>					0,04 ± 0,00	25,00	0,03 ± 0,00	33,33	0,14 ± 0,01	35,71	0,16 ± 0,01	31,35
<i>Phylloscopus collybita</i>					0,04 ± 0,00	25,00	0,03 ± 0,00	33,33	0,12 ± 0,01	25,00	0,15 ± 0,01	26,67
<i>Phylloscopus sibilatrix</i>					0,02 ± 0,00	50,00	0,08 ± 0,01	37,50	0,40 ± 0,01	10,00	0,41 ± 0,01	12,20

Продолжение таблицы

Вид	Возраст сукцессии, лет											
	1-3		4-9		10-20		30-40		60-70		80-90	
	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV	$\bar{x} \pm x$	CV
<i>Muscicapa striata</i>							0,10 ± 0,01	30,00	0,13 ± 0,01	30,77	0,14 ± 0,01	28,57
<i>Ficedula parva</i>									0,01 ± 0,00	100,00	0,01 ± 0,00	100,00
<i>Ficedula hypoleuca</i>							0,03 ± 0,00	33,33	0,23 ± 0,02	26,03	0,28 ± 0,02	25,00
<i>Oriolus oriolus</i>							0,25 ± 0,03	44,00	0,42 ± 0,01	30,80	0,44 ± 0,04	34,01
<i>Garrulus glandarius</i>							0,63 ± 0,06	31,75	0,77 ± 0,08	28,57	1,49 ± 0,11	25,50
<i>Corvus corone</i>									1,67 ± 0,20	41,92	2,82 ± 0,31	37,90
<i>Corvus corax</i>									1,03 ± 0,16	53,40	1,73 ± 0,21	42,20
<i>Columba oenas</i>									0,29 ± 0,04	51,72	0,49 ± 0,06	40,82
<i>Caprimulgus europaeus</i>							0,07 ± 0,01	42,86	0,08 ± 0,01	37,51	0,10 ± 0,02	50,80
<i>Jynx torquilla</i>									0,09 ± 0,01	33,33	0,10 ± 0,01	40,00
<i>Dendrocopos major</i>							0,42 ± 0,04	30,95	1,74 ± 0,10	20,69	2,01 ± 0,11	18,90
<i>Dryocopus martius</i>									0,36 ± 0,05	44,41	0,44 ± 0,06	45,80
<i>Tetrastes bonasia</i>							0,84 ± 0,10	40,48	2,33 ± 0,23	34,76	2,41 ± 0,23	32,78
<i>Scolopax rusticola</i>									0,32 ± 0,05	53,16	0,40 ± 0,05	40,00
<i>Ciconia nigra*</i>									2,25 ± 0,36	56,00	3,43 ± 0,66	66,76
<i>Cuculus canorus</i>									0,12 ± 0,01	41,67	0,12 ± 0,02	50,00
<i>Accipiter gentilis</i>									1,15 ± 0,15	45,22	1,34 ± 0,17	44,78
<i>Accipiter nisus</i>									0,28 ± 0,09	46,43	0,27 ± 0,04	55,35
<i>Buteo buteo</i>									0,73 ± 0,12	16,44	1,00 ± 0,11	38,00
<i>Falco subbuteo*</i>									0,13 ± 0,02	69,23	0,15 ± 0,03	60,60
<i>Pernis apivorus</i>									0,61 ± 0,10	54,10	0,73 ± 0,11	54,79
Количество видов	8		15		15		24		42		41	
Суммарная биомасса, кг/км ²	4,15		5,13		3,28		5,79		25,4		30,71	

Примечание – * – виды, включенные в Красную книгу Республики Беларусь [14].

Значительное увеличение видового разнообразия и суммарной биомассы орнитокомплекса отмечается на стадии соснового леса среднего возраста (60–70 лет): зарегистрировано 42 вида птиц, биомасса которых составляет 25,40 кг/км² (рост в 4,4 раза). Орнитокомплекс приобретает характерный для данного типа леса облик, увеличивается разнообразие дятлообразных (желна *Dryocopus martius*, вертишейка *Jynx torquilla*) и воробьинообразных (зеленушка *Chloris chloris*, желтоголовый королек *Regulus regulus*, обыкновенная пищуха *Certhia familiaris* и др.). Растет количество видов птиц с большой индивидуальной массой тела (черный аист *Ciconia nigra*, дневные хищные птицы: тетеревиный *Accipiter gentilis*, перепелятник *Accipiter nisus*, обыкновенный канюк *Buteo buteo*, чеглок *Falco subbuteo*, обыкновенный осоед *Pernis apivorus*). На стадии спелого соснового леса (80–90 лет) суммарная биомасса увеличивается в 1,2 раза по сравнению с предыдущей стадией (30,71 кг/км²). На стадии возраста 60–70 лет по биомассе доминирует один вид – зяблик, на долю которого приходится 13,2 % суммарного показателя. На последней стадии к нему добавляется черный аист, доля двух доминантов составляет 22,18 % (таблица). Зяблик характеризуется наиболее стабильной биомассой (CV от 6,25 до 7,40 %). Высокая стабильность биомассы присуща для пеночки-трещотки (10,00–12,20 %), лесного конька (15,67–17,65 %), буроголовой гаички (16,67–17,02 %), большой синицы (17,78–19,57 %), зарянки (17,31–21,57 %) и большого дятла (18,90–20,69 %). Для 35,7 % видов характерны высокие показатели коэффициента вариации (40,00–106,00 %), особенно велик этот показатель у малой мухоловки, зеленушки и чеглока. В средневозрастных и спелых сосняках мшистых зарегистрировано 2 вида птиц, включенных в Красную книгу Беларуси [14], – черный аист и чеглок.

Заклучение

В процессе вторичной сукцессии сосняков мшистых выделено 6 стадий развития растительности от свежей вырубki до леса 90-летнего возраста. Параллельно с закономерной сукцессией растительности протекает и смена орнитокомплексов. Основные суммарные показатели населения птиц в сосновых лесах по мере развития сукцессии возрастают: от стадии свежей вырубki до спелого леса возраста 80–90 лет происходит увеличение количества видов в 5,25 раза, биомассы – в 7,4 раза. Высокая стабильность биомассы на разных стадиях сукцессии присуща для 25,0–41,5 % видов, на стадии спелых сосновых лесов в эту группу входит 17 видов (зяблик, пеночка-трещотка, лесной конек, буроголовая гаичка, большая синица, зарянка, большой дятел и др.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Одум, Ю. Основы экологии / Ю. Одум. – М. : Мир, 1975. – 740 с.
2. Данилов, Н. Н. Изменения в орнитофауне зарастающих вырубok на Среднем Урале / Н. Н. Данилов // Зоол. журн. – 1958. – Т. 37, вып. 12. – С. 1898–1903.
3. Иноземцев, А. А. Птицы и лес / А. А. Иноземцев. – М. : Агропромиздат, 1987. – 302 с.
4. Głowaciński, Z. Succession of bird communities in the Nielopolomice Forest (Southern Poland) / Z. Głowaciński // Ecol. Pol. – 1975. – Vol. 23, nr 2. – P. 231–263.
5. Głowaciński, Z. Stability in bird communities during the secondary succession of a forest ecosystem / Z. Głowaciński // Ecol. Pol. – 1981. – Vol. 29, nr 1. – P. 73–95.
6. Helle, P. Annual fluctuations of land bird communities in different successional stages of boreal forest / P. Helle, M. Monkkonen // Ann. Zool. Fennici. – 1986. – Vol. 23. – P. 269–280.
7. Равкин, Ю. С. К методике учета птиц лесных ландшафтов / Ю. С. Равкин // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. – Новосибирск, 1967. – С. 66–75.

8. Järvinen, O. Finnish line transect censuses / O. Järvinen, R. Väisänen // *Ornis fenn.* – 1976. – Vol. 53, nr 4. – P. 115–118.
9. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Выш. шк., 1973. – 320 с.
10. The Clements Checklist of Birds of the World [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/>. – Дата доступа: 15.12.2021.
11. Абрамова, И. В. Структура и динамика населения птиц экосистем юго-запада Беларуси / И. В. Абрамова. – Брест : БрГУ, 2007. – 208 с.
12. Гайдук, В. Е. Экология птиц юго-запада Беларуси. Неворобьинообразные : монография / В. Е. Гайдук, И. В. Абрамова. – Брест : Изд-во БрГУ, 2009. – 300 с.
13. Гайдук, В. Е. Экология птиц юго-запада Беларуси. Воробьинообразные : монография / В. Е. Гайдук, И. В. Абрамова. – Брест : Изд-во БрГУ, 2013. – 298 с.
14. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / гл. редкол.: И. М. Качановский (предс.) [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2015. – 320 с.

REFERENCES

1. Odum, Yu. *Osnovy ekologii* / Yu. Odum. – M. : Mir, 1975. – 740 s.
2. Danilov, N. N. *Izmienienija v ornitofaunie zarastajushchikh vyrubok na Sriedniem Uralie* / N. N. Danilov // *Zool. zhurn.* – 1958. – Т. 37, вып. 12. – S. 1898–1903.
3. Inozemcev, A. A. *Pticy i lies* / A. A. Inozemcev. – M. : Agropromizdat, 1987. – 302 s.
4. Głowaciński, Z. Succession of bird communities in the Nielopolomice Forest (Southern Poland) / Z. Głowaciński // *Ecol. Pol.* – 1975. – Vol. 23, nr 2. – P. 231–263.
5. Głowaciński, Z. Stability in bird communities during the secondary succession of a forest ecosystem / Z. Głowaciński // *Ecol. Pol.* – 1981. – Vol. 29, nr 1. – P. 73–95.
6. Helle, P. Annual fluctuations of land bird communities in different successional stages of boreal forest / P. Helle, M. Monkkonen // *Ann. Zool. Fennici.* – 1986. – Vol. 23. – P. 269–280.
7. Ravkin, Yu. S. *K mietodikie uchiota ptic liesnykh landshaftov* / Yu. S. Ravkin // *Priroda ochagov klieshchievogo encefalita na Altaje.* – Novosibirsk, 1967. – S. 66–75.
8. Järvinen, O. Finnish line transect censuses / O. Järvinen, R. Väisänen // *Ornis fenn.* – 1976. – Vol. 53, nr 4. – P. 115–118.
9. Rokickij, P. F. *Biologichieskaja statistika* / P. F. Rokickij. – Minsk : Vysh. shk., 1973. – 320 s.
10. The Clements Checklist of Birds of the World [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/>. – Дата доступа: 15.12.2021.
11. Abramova, I. V. *Struktura i dinamika nasielienija ptic ekosistiem jugo-zapada Bielarusi* / I. V. Abramova. – Brest : BrGU, 2007. – 208 s.
12. Gajduk, V. Ye. *Ekologija ptic jugo-zapada Bielarusi. Nievorob'inoobraznyje* : monografija / V. Ye. Gajduk, I. V. Abramova. – Brest : Izd-vo BrGU, 2009. – 300 s.
13. Gajduk, V. Ye. *Ekologija ptic jugo-zapada Bielarusi. Vorob'inoobraznyje* : monografiya / V. Ye. Gajduk, I. V. Abramova. – Brest : Izd-vo BrGU, 2013. – 298 s.
14. *Krasnaja kniga Riespubliki Bielarus'. Zhivotnyje : riedkije i nakhodiashchijesia pod ugroznoj ischieznovienija vidy dikikh zhivotnykh* / gl. riedkol.: I. M. Kachanovskij (prieds.) [i dr.]. – 4-е изд. – Минск : Bielarus. Encykl. imia P. Brouki, 2015. – 320 s.

УДК 581.844

Владимир Иванович Бойко

канд. биол. наук, доц., доц. каф. ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Uladzimir Boika

*Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Botany and Ecology
at the Brest State A. S. Pushkin University*

e-mail: boikobio@yandex.by

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ
ОДНОЛЕТНЕГО СТЕБЛЯ НЕКОТОРЫХ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВЫХ
ПОКРЫТОСЕМЕННЫХ РАСТЕНИЙ**

Выявлена анатомическая структура однолетнего стебля древесно-кустарниковых растений, относящихся к семействам Буковых, Пасленовых и Маслинных. Проведена сравнительная характеристика анатомического строения, выявлены диагностические признаки, которые могут быть использованы для уточнения границ таксонов при изучении вопросов филогении, проведении научной и криминалистической экспертиз.

Ключевые слова: олива, бирючина, форзиция, дуб, бук, паслен, эпидерма, перидерма, первичная кора, флоэма, ксилема.

***Comparative Characteristics of the Internal Structure
of the Annual Stem of Some Woody-Shrub Omicroseed Plants***

The anatomical structure of the annual stem of woody-shrub plants belonging to the Beech, Solanaceae and Olive families has been revealed. A comparative characteristic of the anatomical structure has been carried out, diagnostic features have been identified that can be used to clarify the boundaries of taxa, study phylogeny issues, and conduct scientific and forensic examinations.

Key words: olive, oak, beech, nightshade, epidermis, periderm, primary bark, phloem, xylem.

Введение

Комплексное использование растительных ресурсов должно быть основано на знании не только полезности сырья, но и его структуры, обуславливающей технологию переработки, а также сферу применения. Покрытосеменные растения широко используются как витаминоносные растения, для получения пищи и лекарственных препаратов, в качестве кормовой базы и в целях озеленения парков, приусадебных участков.

Изучение анатомического строения однолетнего стебля растений имеет большое значение в целях диагностики и уточнения границ таксонов, для решения вопросов филогении и эволюции, а также для проведения научной и криминалистической экспертиз.

Целью работы было исследование анатомического строения однолетних стеблей некоторых представителей семейств Пасленовых, Буковых и Маслинных.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1) описать топографию и анатомическое строение однолетних стеблей у пяти представителей семейства Пасленовых, семи – Буковых и шести – Маслинных;

2) выявить их диагностические признаки, которые наряду с морфологическими могут быть использованы в прикладных исследованиях.

Материал и методы исследования

Объекты исследования – семейство Буковых: каштан посевной (*Castanea sativa* L.), бук европейский (*Fagus sylvatica* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), дуб северный (*Quercus rubra* L.), дуб пушистый (*Quercus pubescens* L.), дуб пробковый (*Quercus suber* L.),

дуб каменный (*Quercus ilex* L.); семейство Пасленовых: брунфельсия Хопа (*Brunfelsia hopeana* (Hook) Brenth.), физалис перуанский (*Physalis peruviana* L.), физалис декоративный (*Physalis alkekengi* L.), перец овощной (*Capsicum annuum* L.), томат сорта Сливка московская (*Solanum lycopersicum* L. (*slivka moskovskaya.html*)); семейство Маслиновых: сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L.), бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare* L.), жасмин самбак (*Jasminum sambac* L.), маслина европейская (*Olea europaea* L.), форзиция гибридная (*Forsythia hybrida hort.*), форзиция средняя (*Forsythia intermedia* Zab.) (таблица).

Таблица. – Места сбора исследуемых видов

Таксон	Место сбора
Вид <i>Castanea sativa</i> L. Вид <i>Fagus sylvatica</i> L.	Брест, Республика Беларусь
Вид <i>Quercus robur</i> L. Вид <i>Quercus rubra</i> L. Вид <i>Quercus pubescens</i> L. Вид <i>Quercus suber</i> L. Вид <i>Quercus ilex</i> L.	Никитский ботанический сад, Республика Крым, Российская Федерация
Вид <i>Brunfelsia hopeana</i> (Hook) Brenth Вид <i>Physalis peruviana</i> L. Вид <i>Physalis alkekengi</i> L. Вид <i>Capsicum annuum</i> L. Вид <i>Solanum lycopersicum</i> L. (<i>slivka moskovskaya.html</i>)	Брест, Кобрин, Республика Беларусь
Вид <i>Syringa vulgaris</i> L. Вид <i>Ligustrum vulgare</i> L. Вид <i>Jasminum sambac</i> L. Вид <i>Olea europaea</i> L. Вид <i>Forsythia hybrida hort.</i> Вид <i>Forsythia intermedia</i> Zab.	Брест, Республика Беларусь

При выполнении работы нами использованы следующие методики: сбора полевого материала и изготовления постоянных препаратов.

Сбор полевого материала проводился на приусадебном участке г. Кобрин, Никитском ботаническом саду (Российская Федерация), а также в отделе «Зимний сад» Центра экологии Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина. Объекты исследования собирались в октябре–марте с 2016 по 2020 г., т. е. в период, когда камбий находится в неактивном состоянии. Образцы фиксировали в 96 % спирте и выдерживали в смеси спирта и глицерина (1 : 1).

Из образцов однолетнего стебля готовили микрообразцы, которые использовали для получения срезов. Толщина срезов составила 10–30 мкм. Изготавливали их вручную, с помощью лезвия «Спутник». Срезы выполнялись в трех направлениях: поперечном, радиальном и тангентальном. Затем они окрашивались регрессивным способом, путем помещения их в сафранин и нильский синий, после окраски срезы проводили через растворы спиртов разных концентраций (50, 70, 90 % и абсолютный спирт). На следующем этапе они обрабатывались карбол-ксилолом и ксилолом, после чего помещались в канадский бальзам. Таким образом, методика была общепринятой в анатомии растений [1]. Последние анализировали при помощи окулярного микрометра МОВ-1-15.

Результаты и их обсуждение

Семейство Пасленовых. На поперечном срезе однолетний стебель исследованных видов Пасленовых окружен эпидермой, под которой находится перидерма (ткань имеется только у брунфельсии Хопа) [2]. Она (либо эпидерма у остальных) граничит с колленхимой, охватывающей первичную кору. Центральнее располагается кольцо механических элементов, которое окружает первичную и вторичную флоэму. Глубже от последней находятся древесина и сердцевина. Между вторичными проводящими тканями имеется однослойный камбий.

Снаружи стебель покрыт однослойной эпидермой. Тангентальный и радиальный размер ее клеток составляет от 25 до 30 мкм. Наиболее утолщена наружная тангентальная стенка, толщина которой достигает 2 мкм. Трихомы отсутствуют у брунфельсии, но в то же время у всех остальных видов они игловидной формы, причем у томата расширяются в средней части [2–4]. Трихомы перца овощного состоят из трех клеток, а конечная закругляется и приобретает шаровидную форму. Ее диаметр составляет 40 мкм.

Центральнее от эпидермы закладывается перидерма (у брунфельсии). Тип заложения ткани является субэпидермальным. Она типичная, состоит из феллемы, феллогена и феллодермы. В радиальном ряду однолетнего стебля поперечного среза располагается 4–5 слоев клеток пробки. Клетки заполнены воздухом, их радиальный размер составляет 25–30 мкм, а тангентальный – от 15 до 20 мкм. Они имеют прямоугольную форму. Феллема содержит чечевички, которые, как правило, возвышаются над поверхностью стебля.

Под пробкой закладывается феллоген. Ткань представлена одним слоем живых клеток, обеспечивающих образование феллодермы и феллемы. Тангентальный размер клеток феллогена составляет от 25 до 30 мкм, а радиальный – 5–7 мкм. Под феллогеном располагается однослойная феллодерма. Последняя представлена живой паренхимной тканью, ее клетки несколько больше по размеру, чем у феллогена. Радиальный размер клеток феллодермы составляет 10–13 мкм, а тангентальный – 25–30 мкм.

Центральнее от перидермы (либо эпидермы) располагается колленхима, которая представлена равномерно утолщенными клетками. Ткань образована 4–5 слоями паренхимных клеток, их диаметр составляет от 10 до 25 мкм. Клетки имеют форму многогранника. Ширина ткани на поперечном срезе достигает 60 мкм. Колленхима не формируется в однолетнем стебле томата, а у перца овощного на поперечном срезе находится в ребрах, которые возвышаются на поверхности, – образует группы.

Под колленхимой располагается первичная кора. Ткань гомогенная (у брунфельсии, физалиса перуанского и перца овощного), ее клетки имеют вид многогранников, диаметр которых колеблется от 18 до 35 мкм. У физалиса декоративного и томата первичная кора гетерогенная, т. к. содержит брахисклереиды. Кроме того, клетки ткани у томата располагаются подобно паренхиме листа, образуя «столбчатый» и «губчатый» слои. В клетках первичной коры у брунфельсии встречаются многочисленные друзы оксалата кальция.

Кольцо механических элементов на поперечном срезе представлено 2–3 слоями волокон. Оно сплошное, состоит из групп волокон, которые соединены брахисклереидами (у брунфельсии). Поперечники волокон имеют форму пяти-шестиугольников. Их диаметр колеблется в пределах от 10 до 13 мкм. Клетки имеют толстые оболочки, их длина достигает 250–300 мкм. Радиальный размер брахисклереид достигает 20–30 мкм, тангентальный – 10–15 мкм, а толщина стенки – 3–4 мкм. Склерейды образуются из клеток первичной коры. У физалиса декоративного, перца овощного и томата кольцо представлено только группами волокон, а у физалиса перуанского не формируется вообще.

Флоэма на поперечном срезе имеет ширину от 40 до 60 мкм. Ткань представлена проводящими и запасными элементами. У всех исследованных видов, кроме физалиса декоративного, лубяные волокна во флоэме отсутствуют. Членики ситовидных трубок

имеют поперечное сечение в виде четырех- пятиугольников. Их тангентальные стенки слегка вытянуты к периферии стебля и образуют нечеткие радиальные ряды. Радиальный размер члеников составляет 7–9 мкм, а тангентальный – от 10 до 16 мкм.

Сердцевинные лучи однорядные, реже встречаются двухрядные, их ширина составляет 10–15 мкм. Во вторичной флоэме клетки лучей немного расширены, таким образом, происходит их дилатация. Высота сердцевинных лучей составляет от 400 до 500 мкм, а слойность – 16 до 22 клеток. У томата в клетках горизонтальной паренхимы присутствуют призматические кристаллы оксалата кальция.

Вертикальная паренхима представлена клетками округлой формы в поперечнике, их диаметр составляет 9–10 мкм. В вертикальном ряду располагается по 3–4 клетки.

Камбий располагается между вторичными флоэмой и ксилемой. Ткань представлена одним слоем тонкостенных клеток, поперечник которых составляет 5–6 мкм, а длина – до 8–11 мкм.

Ширина ксилемы на поперечном срезе составляет от 500 до 600 мкм. Ткань является рассеяннo-сосудистой и представлена проводящими, запасующими и механическими элементами. Радиальный размер сосудов колеблется в пределах 19–28 мкм, тангентальный – от 20 до 35 мкм, а высота члеников – 70–80 мкм. Они на поперечном срезе образуют радиальные ряды, которые содержат 6–7 сосудов.

Трахеиды имеют диаметр поперечника 8–12 мкм и длину от 300 до 350 мкм. Волокна в поперечном сечении обладают шестиугольной формой. Их тангентальный размер составляет 10–14 мкм, радиальный – 12–16 мкм, а длина – 280–300 мкм.

Волокна образуют толстые стенки, размер которых достигает 3 мкм. Диаметр просвета составляет 8–10 мкм. Клетки на поперечном срезе уложены радиальными рядами.

Лучи однорядные, но также встречаются и двухрядные, их ширина составляет 10–15 мкм, высота – 400–500 мкм, а слойность – от 16 до 22 клеток.

Вертикальная паренхима представлена клетками округлой формы в продольном сечении. Их диаметр достигает от 9 до 10 мкм. В вертикальном ряду на поперечном срезе располагается 3–4 клетки.

Диаметр сердцевинки составляет около от 1 000 до 2 000 мкм. Ткань гомогенная, поперечники клеток имеют форму пяти-шестиугольников, они тонкостенные, а диаметр клеток достигает 40–70 мкм. Только у физалиса декоративного и перца овощного ткань гетерогенная (у первого содержит брахисклереиды, а у второго – слизевые вместилища).

В сердцевине брунфельсии и томата содержится большое количество друз оксалата кальция. Наружные клетки ткани у всех видов образуют перимедуллярную зону. Диаметр ее клеток составляет от 8 до 11 мкм.

У перца овощного и томата ксилема первичная бугорками впячивается в сердцевину, значит, их стебель сформирован на основе прокамбиальных пучков.

Семейство Буковых. Исследованные нами представители семейства Буковых имеют схожую топографию тканей на поперечном срезе стебля. Однолетний стебель имеет следующее расположение тканей: снаружи находится эпидерма, под которой формируется перидерма, граничащая с колленхимой, глубже от нее имеется кольцо первичных механических элементов и рядом с ним – вторичная флоэма, окружающая камбий, центральнее от последнего формируется вторичная, а затем и первичная ксилема. Самое внутреннее расположение занимает сердцевина [5; 6].

Снаружи однолетний стебель покрыт однослойной эпидермой, клетки которой в поперечнике овальной формы у бука европейского, каштана посевного и дуба пробкового, а у остальных представителей – прямоугольной. Тангентальный размер эпидермальных клеток варьирует в пределах от 18 до 22 мкм, а радиальный – 8–10 мкм.

Клетки ткани дубов пушистого, пробкового и каменного образуют звездчатые трихомы. Ткань снаружи покрыта слоем кутикулы толщиной 1–2 мкм, а иногда и до 3 мкм.

В однолетнем стебле рано субэпидермально закладывается перидерма. Ткань представлена феллемой, феллогеном и феллодермой. Феллема состоит из 4–7 слоев клеток в радиальном ряду однолетнего стебля на поперечном срезе (бук европейский, дубы черешчатый и северный) или из 2–3 слоев (каштан посевной, дубы каменный, пушистый и пробковый). Последние заполнены бурым содержимым у всех, кроме дубов каменного, пушистого и пробкового). Клетки пробки прямоугольной формы, их тангентальный размер достигает 15–25 мкм, а радиальный – 8–12 мкм. У дубов пушистого и пробкового радиальные стенки клеток феллемы волнистые, а тангентальные вытянуты к периферии стебля. Феллоген представлен одним слоем овальных в поперечнике клеток, тангентальный размер их составляет 17–30 мкм, а радиальный – 10–18 мкм. Феллодерма на поперечном срезе образована 2–3 слоями клеток овальной формы, их тангентальный размер колеблется в пределах 9–18 мкм, а радиальный – 5–10 мкм.

Колленхима на поперечном срезе однолетнего стебля представлена 2–5 слоями клеток овальной формы, тангентальный размер находится в пределах 18–30 мкм, а радиальный – 8–16 мкм. Ширина ткани составляет 20–40 мкм, колленхима формируется только в стебле бука европейского и каштана посевного, а с возрастом сминается.

Первичная кора гомогенная у бука европейского, каштана конского и дуба черешчатого, а остальные виды обладают гетерогенной паренхимой (в состав входят идиобласты – крупные клетки пяти- и шестиугольной формы, тангентальный размер их равен 25–38 мкм, а радиальный – 15–25 мкм. Наиболее округлые клетки имеют диаметр 10–18 мкм, а также присутствуют брахисклереиды (бук европейский) – 16–45 мкм. В большом количестве в ткани обнаружены кристаллы оксалата кальция призматической формы и в виде друз (кроме дубов черешчатого и пушистого). Ширина ткани составляет 30–45 мкм.

Кольцо первичных механических элементов гетерогенное, сплошное, соединено склереидами. В его состав входят волокна, их диаметр равен 17–23 мкм, а длина – 400–600 мкм) и брахисклереиды, тангентальный размер которых находится в пределах 18–42 мкм, а радиальный – 13–19 мкм. Ширина ткани достигает 15–45 мкм.

Вторичная флоэма представлена проводящими, запасными и механическими элементами. Проводящие элементы – ситовидные трубки, диаметр их члеников в поперечном сечении составляет 9–14 мкм. Членики имеют длину 30–50 мкм, на их поперечных стенках расположены округлые ситовидные поля, диаметр которых приблизительно равен 2–3 мкм. На поперечном срезе членики ситовидных трубок расположены рассеянно, не формируют четких радиальных рядов. На продольном срезе их поперечные стенки слегка наклонены по отношению к продольным.

Запасные элементы представлены вертикальной и горизонтальной паренхимой. Тангентальный размер клеток аксикальной паренхимы находится в пределах от 10 до 17 мкм, а радиальный – от 6 до 11 мкм. Сердцевинные лучи во флоэме однорядны (каштан посевной и дуб черешчатый), но изредка встречаются трех-, пяти- и шестирядные (у остальных). Их ширина варьирует в пределах 10–15 мкм (иногда 30–50 мкм), а высота – 350–400 мкм. На продольном срезе в клетках вертикальной паренхимы и лучей обнаружены кристаллы оксалата кальция призматической формы (у всех, кроме каштана посевного и дуба черешчатого). Ширина ткани составляет 100–120 мкм.

Лубяные волокна обнаружены только у каштана посевного, дубов черешчатого и пушистого). Их поперечник пяти- шестиугольной формы диаметром 14–24 мкм, а длина составляет 250–330 мкм.

На границе между вторичной флоэмой и вторичной ксилемой расположен камбий, состоящий из одного слоя клеток веретеновидной формы. Иногда они формируют камбиальную зону. Диаметр поперечника составляет 5–8 мкм, высота клеток – 25–33 мкм.

Вторичная ксилема является рассеянно-сосудистой (у бука европейского, каштана посевного и дуба каменного), остальные виды характеризуются кольцесосудистой тканью. Древесина представлена сосудами и трахеидами, волокнами либриформа, сердцевинными лучами и вертикальной паренхимой. Сосуды пяти- и шестиугольной формы в поперечнике, их тангентальный размер равен 30–45 мкм, а радиальный – 25–40 мкм. Длина члеников составляет 70–100 мкм. На продольном срезе на стенках сосудов хорошо видны округлые поры (характерна сетчатая поровость для бука европейского и дуба пушистого). У молодых сосудов и трахеид наблюдается вторичное спиральное утолщение стенок. Между члениками сосудов у бука европейского и дуба пушистого находятся округлые (простые) перфорации, а у остальных – лестничные.

Серцевинные лучи во вторичной ксилеме однорядны, но иногда встречаются трех-, пяти- и шестирядные. Их ширина составляет 9–21 мкм, высота – 450–550 мкм. Вертикальная паренхима представлена на продольном срезе 2–4 слоями клеток овальной в поперечнике формы, диаметр которых равен 8–11 мкм.

Волокна либриформа образованы толстостенными клетками овальной в поперечнике формы, их диаметр составляет 5–8 мкм, а высота – 500–600 мкм. Они собраны в группы по 4–15. Ширина древесины достигает 160–180 мкм.

Первичная ксилема пучками внедряется в сердцевину. Ее составляют мелкие, округлые в поперечнике сосуды. Таким образом, стебель сформирован на основе прокамбиальных пучков.

Серцевина гомогенная, сложенная тонкостенными округлыми клетками, диаметр поперечника достигает 22–38 мкм. В клетках имеются кристаллы оксалата кальция различной формы: призматические (дубы пушистый и каменный), друзы (дубы черешчатый и северный), призматические и друзы (бук европейский, каштан посевной и дуб пробковый). Перимедулярная зона образована мелкими тонкостенными клетками округлой формы, их диаметр 5–7 мкм.

Семейство Маслиновых. Снаружи стебель покрыт однослойной эпидермой, под которой находится перидерма (ткань в однолетнем стебле не формируется только в стебле жасмина Самбак. У этого же вида под эпидермой формируется колленхима. Центральнее перидермы (эпидермы у жасмина) располагается первичная кора, граничащая с механическим кольцом. Оно охватывает вторичную флоэму, которая камбием ограничена от вторичной ксилемы. Самое центральное положение занимает сердцевина.

Однолетний стебель покрыт однослойной эпидермой. Тангентальный размер клеток составляет от 20 до 27 мкм, а радиальный – 15–18 мкм, поперечник клеток овальной формы, их наружные тангентальные стенки вытянуты к периферии стебля и наиболее утолщены. Последние покрыты слоем кутикулы толщиной до 2–3 мкм.

Клетки эпидермы образуют трихомы в виде волосков длиной до 40–50 мкм. Последние заполнены воздухом, т. е. являются кроющими. Эпидерма форзиций и сирени волосков не образует. У этих же видов ткань рано отмирает и сшелушивается.

Субэпидермально располагается перидерма, ширина которой на поперечном срезе достигает до 160 мкм. Ткань типичная, представлена феллемой, феллогеном и феллодермой. Клетки пробки имеют форму от квадратной до прямоугольной. Они тонкостенные, заполнены воздухом. В радиальном ряду поперечного среза однолетнего стебля располагается до 6–7 клеток пробки. Их тангентальный размер составляет от 25 до 50 мкм, а радиальный – от 25 до 40 мкм. В периферических слоях клетки феллемы более крупные. Феллоген и феллодерма типичные. Ткань не формируется в однолетнем стебле жасмина Самбак [7].

Глубже от перидермы располагается первичная кора. Ткань имеет ширину на поперечном срезе до 200–300 мкм. Она гомогенна, состоит из мелких клеток овальной

формы, их размеры на границе с перидермой уменьшаются. Диаметр поперечника клеток составляет от 30 до 60 мкм. Только у жасмина Самбак и форзиции гибридной первичная кора гетерогенная, т. к. в ней имеются тонкостенные идиобласты помимо остальных клеток ткани [8].

Глубже от первичной коры располагается кольцо механических элементов, которое представлено группами волокон (лишь только у бирючины оно сплошное). У оливы ткань гетерогенная, т. е. представлена волокнами и склереидами. Ширина кольца на поперечном срезе составляет до 30 мкм.

Волокна имеют в поперечнике пяти- либо шестиугольную форму. Их концы заострены, тангентальный размер поперечника колеблется от 17 до 25 мкм, а радиальный – от 9 до 20 мкм.

Центральнее от механического кольца располагается вторичная флоэма. Ширина ткани на поперечном срезе достигает 50 мкм. Ткань представлена проводящими, запасующими и механическими элементами. Последние отсутствуют у маслины, сирени и форзиции средней.

Проводящие элементы – ситовидные трубки, которые в поперечниках имеют четырех- или пятиугольную форму. На поперечном срезе они уложены радиальными рядами. Их тангентальный размер составляет 11–20 мкм, а радиальный – 12–16 мкм. Длина члеников ситовидных трубок достигает 40 мкм.

Лучи в основном гомогенные, однорядные, их ширина составляет 12–20 мкм, высота – 450–600 мкм, а слойность – 8–14 клеток.

Вторичная ксилема состоит из проводящих (сосуды и трахеиды), запасующих (вертикальная и горизонтальная паренхимы) и механических элементов (либриформ). Диаметр сосудов достигает 45–120 мкм, а высота члеников – 90–140 мкм. Они располагаются одиночно, но могут быть сдвоенными.

Трахеиды в поперечном сечении четырех- шестиугольной формы, диаметр составляет 12–17 мкм, а высота – 270–300 мкм. Размеры древесинных волокон примерно такие же.

Дучи гомогенные, имеют ширину 20–35 мкм, высоту – до 250 мкм, слойность – 15–30 клеток.

По структуре вторичная ксилема у бирючины, жасмина и форзиций является рассеянно-сосудистой, а у сирени и маслины – кольцесосудистой.

Сердцевина занимает самое центральное расположение в стебле. Диаметр ткани достигает 2 000 мкм. Обычно ткань гомогенная, ее клетки не содержат кристаллов оксалата кальция, но у жасмина и форзиции гибридной она имеет гетерогенную структуру.

В целях таксономии и систематики используются не только морфологические, но и анатомические признаки. Первая попытка построения ключей по внутренним признакам для покрытосеменных была сделана Е. В. Малыченко для ив средней полосы России [9], позже В. И. Бойко для семейства Ericaceae Juss. [10], а затем Д. И. Шевчук для семейства Буковых [11].

Нами выявлены анатомические признаки изученных представителей семейств Пасленовых, Маслинных и Буковых, которые могут быть использованы в качестве диагностических.

Сравнительно-анатомический анализ тканей однолетних стеблей исследованных представителей семейств позволил выделить следующие диагностические признаки.

Эпидерма:

- 1) срок функционирования ткани;
- 2) наличие или отсутствие трихом;
- 3) форма трихом и их структура (одноклеточные или многоклеточные).

Перидерма:

- 1) диагностическим признаком является наличие или отсутствие этой ткани;
- 2) форма клеток феллемы на поперечном срезе;
- 3) количество клеток пробки в радиальном ряду поперечника однолетнего среза;
- 4) место и время заложения феллогена.

Колленхима:

- 1) форма клеток ткани в поперечнике;
- 2) располагается сплошным кольцом или группами клеток.

Паренхима первичной коры:

- 1) структура ткани (гомогенная или гетерогенная);
- 2) наличие или отсутствие склереид;
- 3) наличие или отсутствие кристаллов оксалата кальция.

Кольцо первичных механических элементов:

- 1) наличие или отсутствие ткани;
- 2) структура ткани (гомогенная или гетерогенная);
- 3) количество и форма волокон в группах;
- 4) структура расположения (сплошное или прерывистое).

Вторичная флоэма:

- 1) рядность лучей флоэмы;
- 2) форма члеников ситовидных трубок на поперечном срезе;
- 3) форма ситовидных полей;
- 4) наличие кристаллов оксалата кальция в клетках флоэмных лучей;
- 5) структура лучей (гомогенные или гетерогенные).

Древесина:

- 1) диагностическим признаком является расположение первичной ксилемы пучками или сплошным кольцом;
- 2) тип ткани: кольцесосудистая или рассеянно-сосудистая;
- 3) наличие кристаллов в лучах.

Сердцевина:

- 1) структура ткани (гомогенная или гетерогенная);
- 2) наличие или отсутствие склереид;
- 3) наличие или отсутствие кристаллов оксалата кальция.

Заключение

Проведенный анализ структуры однолетнего стебля 18 представителей покрытосеменных растений, принадлежащих к семействам Пасленовых, Буковых и Маслинных, позволил сделать следующие выводы.

1. У всех исследованных видов орган сложен как тканями первичного происхождения (эпидерма, колленхима, первичная кора, механическое кольцо, первичные ксилема и флоэма, сердцевина), так и вторичного (перидерма, камбий, вторичные ксилема и флоэма).

2. Все объекты имеют схожую топографию тканей на поперечном срезе стебля.

3. Несмотря на схожесть в строении и расположении тканей, в анатомическом строении изученных растений имеются различия: наличие или отсутствие перидермы, колленхимы, механического кольца, волокон во флоэме, кристаллов оксалата кальция, брахисклереид в первичной коре и сердцевине, волосков в эпидерме, структура запасющих тканей (гомогенная, либо гетерогенная); наличие слизевых вместилищ. Эти признаки мы выделяем как диагностические.

Проведенный структурный анализ выявил, что ни один из исследованных видов нельзя выделить по какому-то одному анатомическому признаку, в то же время каждое из растений характеризуется набором качеств, которые отличают его от других.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прозина, М. Н. Ботаническая микротехника / М. Н. Прозина. – М. : Высш. шк., 1960. – 206 с.
2. Бойко, В. И. Особенности анатомической структуры стебля Брунфельсии Хопа / В. И. Бойко, П. Ю. Шевцова // Актуальные проблемы лесного комплекса : сб. науч. тр. ; под общ. ред. Е. А. Памфилова. – Брянск : БГИТУ, 2020. – Вып. 58. – С. 70–73.
3. Шевцова, П. Ю. Анатомическое строение однолетнего стебля перца овощного / П. Ю. Шевцова, В. И. Бойко // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации : сб. науч. ст. по материалам V Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 25 мая 2021 г. – Уфа : НИЦ Вестн. науки, 2021. – С. 58–61.
4. Шевцова, П. Ю. Внутреннее строение однолетнего стебля томата (сорт Сливка московская) / П. Ю. Шевцова, В. И. Бойко // Актуальные вопросы современной науки : сб. науч. ст. по материалам V Всерос. конкурса науч.-исслед. работ. – Уфа : НИЦ Вестн. науки, 2021. – С. 57–60.
5. Шевчук, Д. И. Сравнительная анатомическая характеристика однолетних стеблей дуба пушистого (*Quercus rubescens* L.) и каштана посевного (*Castanea sativa* L.) / Д. И. Шевчук, В. И. Бойко // Актуальные проблемы лесного комплекса : сб. науч. тр. ; под ред. Е. А. Памфилова. – Брянск : Изд-во БГИТУ, 2020. – С. 161–164.
6. Шевчук, Д. И. Анатомия стебля дуба каменного (*Quercus ilex* L.) / Д. И. Шевчук, В. И. Бойко // Технологические инновации в современном мире : сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 28 нояб. 2019 г. в : 3 т. ; под ред. А. Р. Халикова. – Уфа : НИЦ Вестн. науки, 2019. – Т. 1. – С. 42–46.
7. Тропец, С. А. Анатомическое строение вегетативных органов маслины европейской (*Olea europaea* L.) / С. А. Тропец, В. И. Бойко // Инновации в науке и практике : сб. ст. по материалам VI междунар. науч.-практ. конф. : в 5 ч. – Барнаул, 2018. – Ч. 4. – С. 39–45.
8. Тропец, С. А. Анатомическое строение вегетативных органов форзиции средней (*Forsythia Intermedia* L.) / С. А. Тропец, В. И. Бойко // Инновации в науке и практике : сб. ст. по материалам XVI междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 17 апр. 2019 г. : в 3 ч. – Барнаул : Дендра, 2019. – Ч. 2. – С. 9–13.
9. Малыченко, Е. В. Анатомия коры ив средней полосы Европейской части СССР : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.05 / Е. В. Малыченко. – М., 1986. – 22 с.
10. Бойко, В. И. Анатомическое строение коры видов семейства *Ericaceae* Juss. : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.05 / В. И. Бойко ; Воронеж. гос. ун-т. – Воронеж, 1996. – 18 с.
11. Шевчук, Д. И. Таксономическая ценность анатомических признаков надземных вегетативных органов семейства Буковых (*Fagaceae* Dumort.) / Д. И. Шевчук, В. И. Бойко // Современные исследования в гуманитарных и естественнонаучных отраслях : сб. науч. ст. : в IV ч. ; науч. ред. канд. пед. наук Т. А. Колесникова. – М. : Перо, 2020. – Ч. IV. – С. 38–42.

REFERENCES

1. Prozina, M. N. Botanicheskaja mikrotiekhnika / M. N. Prozina. – M. : Vyssh. shk., 1960. – 206 s.
2. Bojko, V. I. Osobiennosti anatomichieskoj struktury stieblia Brunfiel'sii Khopa / V. I. Bojko, P. Yu. Shevcova // Aktual'nyje probliemy liesnogo kompleksa : sb. nauch. tr. ; pod obshch. ried. Ye. A. Pamfilova. – Briansk : BGITU, 2020. – Vyp. 58. – S. 70–73.

3. Shevcova, P. Yu. Anatomichieskoje strojenije odnolietniego stieblia pierca ovoshchnogo / P. Yu. Shevcova, V. I. Bojko // Fundamental'nyje i prikladnyje nauchnyje issliedovanija: aktual'nyje voprosy sovriemiennoj nauki, dostizhenija i innovacii : sb. st. po materialam V Miezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ufa, 25 maja 2021 g. – Ufa: NIC Viestn. nauki, 2021. – S. 58–61.

4. Shevcova, P. Yu. Vnutriennieje strojenije odnolietniego stieblia tomata (sort Slivka moskovskaja) / P. Yu. Shevcova, V. I. Bojko // Aktual'nyje voprosy sovriemiennoj nauki : sb. nauch. st. po materialam V Vsieros. konkursa nauch.-isslied. rabot. – Ufa : NIC Viestn. nauki, 2021. – S. 57–60.

5. Shevchuk, D. I. Sravnitel'naja anatomichieskaja kharakteristika odnolietnikh stiebliej duba pushistogo (*Quercus pubescens* L.) i kashtana posievnogo (*Castanea sativa* L.) / D. I. Shevchuk, V. I. Bojko // Aktual'nyje problemi liesnogo kompleksa : sb. nauch. tr. ; pod ried. Ye. A. Pamfilova. – Briansk Izd-vo BGITU, 2020. – S. 161–164.

6. Shevchuk, D. I. Anatomija stieblia duba kamiennogo (*Quercus ilex* L.) / D. I. Shevchuk, V. I. Bojko // Tiekhnologichieskije innovacii v sovriemennom mirie : sb. st. po materialam miezhnunar. nauch.-prakt. konf., Ufa, 28 nojab. 2019 g. : v 3 t. ; pod ried. A. R. Khalikova. – Ufa : NIC Viestn. nauki, 2019. – T. 1. – S. 42–46.

7. Tropiec, S. A. Anatomichieskoje strojenije viegietativnykh organov masliny jevropiejskoj (*Olea europaea* L.) / S. A. Tropiec, V. I. Bojko // Innovacii v naukie i praktike : sb. st. po materialam VI miezhnunar. nauch.-prakt. konf. : v 5 ch. – Barnaul, 2018. – Ch. 4. – S. 39–45.

8. Tropiec, S. A. Anatomichieskoje strojenije viegietativnykh organov forzicii sriednej (*Forsythia intermedia* L.) / S. A. Tropiec, V. I. Bojko // Innovacii v naukie i praktike : sb. st. po materialam XVI miezhnunar. nauch.-prakt. konf., Barnaul, 17 apr. 2019 g. : v 3 ch. – Barnaul : Dendra, 2019. – Ch. 2. – S. 9–13.

9. Malychienko, Ye. V. Anatomija kory iv sriednej polosy Jevropiejskoj chasti SSSR : avtorief. dis. ... cand. biol. nauk : 03.00.05 / Ye. V. Malychienko. – M., 1986. – 22 s.

10. Bojko, V. I. Anatomichieskoje strojenije kory vidov siemiejstva Ericaceae Juss. : avtorief. dis. ... cand. biol. nauk : 03.00.05 / V. I. Bojko ; Voroniez. gos. un-t. – Voroniez, 1996. – 18 s.

11. Shevchuk, D. I. Taksonomichieskaja cennost' anatomichieskikh priznakov nadziemnykh viegietativnykh organov siemiejstva Bukovykh (*Fagaceae* Dumort.) / D. I. Shevchuk, V. I. Bojko // Sovriemiennyje issliedovanija v gumanitarnykh i jestiestviennonauchnykh otrasliakh : sb. nauch. st. : v IV ch. ; nauch. ried. kand. pied. nauk T. A. Koliesnikova. – M. : Piero, 2020. – Ch. IV. – S. 38–42.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 31.03.2022

УДК 577.175.1: 57.085

Виктор Викторович Коваленко¹ст. преподаватель каф. химии

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Viktar Kavalenka¹Senior lecturer of the Department of Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: kvv0407@rambler.ru

**ВЛИЯНИЕ ЭПИКАСТАСТЕРОНА И ЕГО КОНЬЮГАТОВ
НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ И ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ ТИМОФЕЕВКИ ЛУГОВОЙ (*PHLEUM PRATENSE* L.)***

Исследованы закономерности воздействия малоизученных конъюгатов 24-эпикастастерона на морфометрические и биохимические параметры тимофеевки луговой в лабораторных условиях. Изучено влияние фитогормонов на энергию прорастания, всхожесть семян, длину корней и побегов, массу побегов тимофеевки, а также содержание основных фотосинтетических пигментов и белка. Зафиксировано повышение ростовых параметров тимофеевки с одновременным увеличением массы побегов, а также содержания фотосинтетических пигментов и белка. Проведенное исследование имеет большое значение для создания новых средств регуляции роста и адаптации растений, поскольку на растениях тимофеевки конъюгаты 24-эпикастастерона ранее не были изучены.

Ключевые слова: тимофеевка луговая, энергия прорастания, всхожесть, брассиностероиды, 24-эпикастастерон, конъюгаты 24-эпикастастерона, хлорофилл, каротиноиды.

***Influence of Epicastasterone and its Conjugates on Morphometric
and Physiological-Biochemical Parameters of Timothy (*PHLEUM PRATENSE* L.)***

The regularities of the effect of poorly studied conjugates of 24-epicastasterone on morphometric and biochemical parameters of Timothy in laboratory conditions were investigated. The effect of phytohormones on germination energy, seed germination, root and shoot length, timothy shoot mass, as well as the content of the main photosynthetic pigments and protein was studied. An increase in the growth parameters of Timothy was recorded with a simultaneous increase in the mass of shoots, as well as the content of photosynthetic pigments and protein. The study is significant for the creation of new means of regulating plant growth and adaptation since conjugates of 24-epicastasterone have not been studied in Timothy plants before.

Key words: Timothy, germination energy, germination, brassinosteroids, 24-epitestosterone, conjugates of 24-epicastasterone, chlorophyll, carotenoids.

Введение

Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.) – один из самых распространенных видов злаковых трав. Она возделывается в Нечерноземной, на севере Лесостепной зоны, на Крайнем Севере и Северном Кавказе и используется как пастбищная и сенокосная культура, а также как газонная трава в озеленении и ландшафтном дизайне. Тимофеевка луговая возделывается как в чистых посевах, так и в травосмесях, в частности с клевером луговым. Заготавливается в виде сена, силоса, сенажа, травяной муки. В 100 кг сена тимофеевки содержится 3,1 кг переваримого белка [1]. Средняя урожайность сена тимофеевки на суходольных лугах составляет 4–4,5 т/га, на низинных лугах – 5–6 т/га, на осушенных болотах – 6–8 т/га. Тимофеевка луговая имеет хорошую семенную продуктивность и при высокой агротехнике урожайность семян достигает 1 т/га [2]. Тимофеевка луговая морозостойчива, к почве малотребовательна. Влаголюбива, переносит временное избыточное

*Работа выполнена в рамках НИР «Оценка влияния природных брассиностероидов и их конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические параметры сельскохозяйственных и декоративных растений» подпрограммы 2.3 «Химические основы процессов жизнедеятельности (Биоорхимия)» ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия» на 2021–2025 гг.

увлажнение и непродолжительное затопление, почвенную и воздушную засуху переносит с трудом [2]. В процессах регуляции развития растений и адаптации к воздействию различных стресс-факторов участвуют брассиностероиды (БС) [3]. Несмотря на большое количество исследований биологической активности брассиностероидов, актуальным является изучение воздействия его метаболических превращений. В лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси для изучения биологического влияния БС и их производных были синтезированы конъюгаты 24-эпикастастерона (ЭК) с кислотами. Имеются данные о росторегулирующей, стресс-протекторной и антиоксидантной активности конъюгатов БС с кислотами на молодые растения [4; 5]. В связи с этим для тимофеевки луговой проведено исследование двух новосинтезированных конъюгатов ЭК.

Целью данного этапа исследования является изучение эффективности 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические параметры тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) в лабораторных условиях.

Материал и методы исследования

24-эпикастастерон (ЭК) и его конъюгаты с кислотами 2-моносалицилат 24-эпикастастерона (S23) и тетраиндолилацетат 24-эпикастастерона (S31) синтезированы в Лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси. Для биоиспытаний использовались семена тимофеевки луговой сорта «Воля» *Phleum pratense* L.

На первом этапе исследования с целью определения оптимальных концентраций стероидных соединений, оказывающих наибольшее влияние на процессы роста и развития тимофеевки луговой в лабораторных условиях были использованы следующие концентрации стероидных соединений: 10^{-11} М, 10^{-10} М, 10^{-9} М, 10^{-8} М, 10^{-7} М.

Растворы БС были приготовлены путем растворения сухих веществ в этаноле до концентрации 10^{-4} М с дальнейшим разбавлением дистиллированной водой до рабочих концентраций.

Обработка исследуемыми веществами проводилась однократно в виде предварительного замачивания семян на 5 часов. Проращивание семян осуществляли в термостате при температуре 20 ± 2 °С в чашках Петри на бумаге в темноте согласно ГОСТу 12038-84 [6]. Повторность опыта четырехкратная. По истечении 4 суток фиксировали энергию прорастания семян, через 8 суток определяли всхожесть, среднюю длину корней и побегов проростков тимофеевки [7]. В результате проведенных опытов были отобраны эффективные концентрации ЭК и каждого из его конъюгатов для дальнейших исследований.

На втором этапе исследования определялось влияние изучаемых соединений в вегетационном лабораторном эксперименте. В лабораторных условиях на почвенной среде [8; 9] с использованием предпосевной обработки (замачивание семян) были протестированы отобранные на предыдущем этапе соединения и их концентрации, проявляющие наибольший стимулирующий эффект в отношении показателей роста и развития тимофеевки луговой. При предпосевной обработке семена замачивали в растворах ЭК в концентрации 10^{-8} М и S31 в концентрации 10^{-9} М в течение 5 часов, далее высаживали в пластиковые контейнеры $9 \times 9 \times 8$ см на универсальном почвогрунте («Хозяин, Карио», Беларусь) и выращивали при $22-25$ °С в лабораторных условиях вегетационного эксперимента в течение 2 недель. В качестве контроля использовались растения, обработанные дистиллированной водой. Всхожесть определяли на 8-е сутки эксперимента. На 14-е сутки эксперимента определяли длину побегов 50 проростков, сырую массу 10 побегов, а также содержание основных фотосинтетических пигментов и белков.

Воздушно-сухую массу побегов определяли после высушивания побегов при комнатной температуре в течение 2 недель. 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

Определение эффективных концентраций ЭК и его конъюгатов в лабораторных условиях

В результате лабораторного опыта по подбору оптимальных концентраций тестируемых веществ выявлено, что во всех исследуемых концентрациях ЭК понижает энергию прорастания и всхожесть семян тимофеевки. Статистически достоверное ингибирующее действие ЭК проявляется в концентрации 10^{-9} М. В данном варианте опыта показатель энергии прорастания уменьшается на 7 %, показатель всхожести – на 8 % по сравнению с контролем (таблица 1).

Таблица 1. – Влияние эпикастерона и его конъюгатов на морфометрические показатели тимофеевки луговой

Вариант опыта	Энергия прорастания	Всхожесть	Длина корня		Длина побега	
	(%)		мм	% к контролю	мм	% к контролю
24-эпикастерон						
Контроль	79,0 ± 2,04	83,0 ± 1,88	22,2 ± 1,13	100,0	28,5 ± 0,78	100,0
10^{-11} М	78,0 ± 2,07	83,0 ± 1,88	24,4 ± 0,95	109,9	30,3 ± 0,85	106,3
10^{-10} М	76,0 ± 2,14	79,0 ± 2,04	22,3 ± 0,82	100,5	30,2 ± 0,98	106,0
10^{-9} М	72,0 ± 2,24*	75,0 ± 2,17**	23,4 ± 1,06	105,4	30,3 ± 0,73	106,3
10^{-8} М	76,0 ± 2,14	80,0 ± 2,00	25,9 ± 0,97*	116,7	29,9 ± 0,70	104,9
10^{-7} М	72,0 ± 2,24	78,0 ± 2,07	24,2 ± 1,11	109,0	27,3 ± 0,77	95,8
2-моносалицлат 24-эпикастерона (S23)						
Контроль	79,0 ± 2,04	83,0 ± 1,88	22,2 ± 1,13	100,0	28,5 ± 0,78	100,0
10^{-11} М	79,0 ± 2,04	81,0 ± 1,96	22,6 ± 1,25	101,8	29,7 ± 0,89	104,2
10^{-10} М	79,0 ± 2,04	82,0 ± 1,92	21,4 ± 0,91	96,4	29,4 ± 1,02	103,2
10^{-9} М	77,0 ± 2,10	80,0 ± 2,00	22,6 ± 1,27	101,8	29,7 ± 0,87	104,2
10^{-8} М	78,0 ± 2,07	82,0 ± 1,92	22,7 ± 0,89	100,9	33,1 ± 0,97***	116,1
10^{-7} М	79,0 ± 2,04	84,0 ± 1,83	20,9 ± 1,00	94,1	25,2 ± 0,96**	88,4
тетраиндолилacetат 24-эпикастерона (S31)						
Контроль	79,0 ± 2,04	83,0 ± 1,88	22,2 ± 1,13	100,0	28,5 ± 0,78	100,0
10^{-11} М	75,0 ± 2,17	77,0 ± 2,10*	25,5 ± 1,25*	114,9	30,1 ± 0,74	105,6
10^{-10} М	78,0 ± 2,07	86,0 ± 1,73	22,1 ± 1,13	99,5	32,9 ± 0,91***	115,4
10^{-9} М	83,0 ± 1,88	83,0 ± 1,88	25,3 ± 0,76*	114,0	30,5 ± 0,75	107,0
10^{-8} М	77,0 ± 2,10	79,0 ± 2,04	22,8 ± 1,02	102,7	29,6 ± 0,85	103,9
10^{-7} М	84,0 ± 1,83	84,0 ± 1,83	22,8 ± 1,02	102,7	27,5 ± 0,90	96,5

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.

Во всех исследуемых концентрациях ЭК увеличивает длину корней проростков тимофеевки. Статистически достоверное стимулирующее действие ЭК проявляется в концентрации 10^{-8} М. По сравнению с контролем увеличение длины корня в данном варианте опыта составляет 16,7 %. Во всех исследуемых концентрациях, кроме максимальной, ЭК увеличивает длину побега проростков тимофеевки. Однако статистически достоверного эффекта в данной серии эксперимента не наблюдалось.

S23 не оказывает значительного влияния на энергию прорастания и всхожесть семян тимофеевки, поскольку отличия данных показателей в опыте и контроле находятся в границах ошибки репрезентативности. Несущественным также является действие *S23* в отношении показателя длины корня проростков тимофеевки. В данной серии эксперимента в зависимости от варианта опыта наблюдалось как незначительное стимулирование роста корня, так и ингибирование. Более заметным является действие *S23* в отношении длины побега проростков тимофеевки. Так, в отношении данного показателя в концентрации 10^{-8} М наблюдается статистически достоверный стимулирующий эффект, а в концентрации 10^{-7} М – статистически достоверный ингибирующий эффект.

S31 в зависимости от концентрации способствует как увеличению, так и уменьшению показателей энергии прорастания и всхожести семян тимофеевки. В отношении энергии прорастания наибольший стимулирующий эффект отмечается в варианте опыта с концентрацией 10^{-7} М, в отношении всхожести – в варианте опыта с концентрацией 10^{-10} М. В варианте опыта с концентрацией 10^{-11} М наблюдается статистически достоверный ингибирующий эффект в отношении показателя всхожести. В достаточно широком диапазоне концентраций *S31* способствует увеличению прироста длины корня и длины побега проростков тимофеевки. Статистически достоверное увеличение длины корня зафиксировано в варианте опыта с концентрациями 10^{-9} М и 10^{-11} М. По сравнению с контролем отличия данных показателей составляют 14 и 14,9 % соответственно. Статистически достоверное увеличение длины побега зафиксировано в варианте опыта с концентрацией 10^{-10} М. Отличие показателя длины побега в данном варианте опыта по сравнению с контролем составляет 15,4 %.

Относительно *ЭК* в одинаковых концентрациях оба конъюгата проявили активность на энергию прорастания и всхожесть семян тимофеевки в концентрации 10^{-7} М и 10^{-9} М, однако наибольшую активность проявил *S31*. Под действием конъюгатов по сравнению с *ЭК* в тех же концентрациях отмечается понижение длины корней и побегов, за исключением небольшого увеличения длины корней под воздействием *S31* в концентрации 10^{-11} М и 10^{-9} М, а также небольшого увеличения длины побегов под воздействием *S23* в концентрации 10^{-8} М и *S31* в концентрации 10^{-10} М.

Таким образом, изучаемые соединения оказывают несущественное влияние на энергию прорастания и всхожесть семян тимофеевки. *ЭК* в достаточно широком диапазоне концентраций (10^{-8} – 10^{-11} М) и *S31* в концентрациях 10^{-9} – 10^{-11} М оказывают стимулирующий эффект в отношении длины корня и длины побега проростков тимофеевки луговой. Наибольший стимулирующий эффект наблюдался в вариантах опыта *ЭК* в концентрации 10^{-8} М и *S31* в концентрации 10^{-9} М.

Определение воздействия ЭК и его конъюгата в вегетационном лабораторном эксперименте

В связи с выявленной активностью *ЭК* и *S31* в лабораторном эксперименте на втором этапе исследования изучалось действие данных соединений в ходе вегетационного лабораторного эксперимента на почвенной среде. В результате исследования влияния *ЭК* в концентрации 10^{-8} М и *S31* в концентрации 10^{-9} М на всхожесть семян тимофеевки, длину побега, массу побегов проростков тимофеевки в почвенной среде наблюдается стимулирующее действие *ЭК* в отношении всех изучаемых показателей роста тимофеевки луговой (таблица 2).

Таблица 2. – Влияние эпикастастерона и его конъюгата на морфометрические показатели тимофеевки луговой в вегетационном опыте

Вариант опыта	Всхожесть, %	Длина побега		Масса побегов	
		мм	% к контролю	г	% к контролю
Контроль	50,0 ± 3,16	34,5 ± 1,51	100,0	0,00236 ± 0,00014	100,0
ЭК	58,0 ± 3,12	42,4 ± 0,99***	122,9	0,0033 ± 0,00021***	139,8
S31	47,0 ± 3,16	39,9 ± 1,48*	115,7	0,00266 ± 0,00018	112,7

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

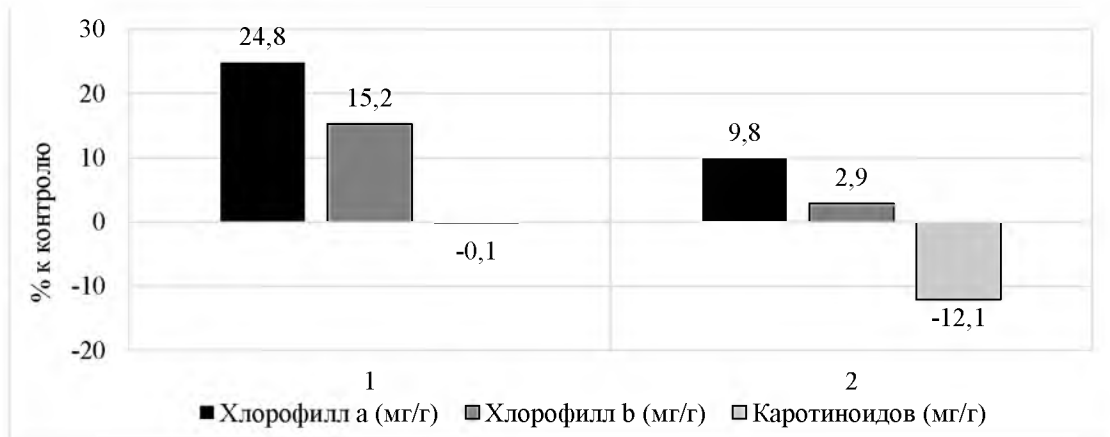
Так, по сравнению с контролем увеличение показателя всхожести семян составляет 8 %, увеличение длины побега – 22,9 %, увеличение массы побегов – 39,8 %. Следует отметить статистически достоверный стимулирующий эффект ЭК в отношении прироста длины побега и массы побегов проростков тимофеевки луговой. В варианте опыта с S31 наблюдается уменьшение всхожести на 3 %, увеличение длины побега на 15,7 %, увеличение массы побегов на 12,7 % по сравнению с контролем. В результате вегетационного опыта ни на один из исследуемых параметров относительно ЭК в одинаковой концентрации S31 не проявил активности.

Важную роль в формировании продуктивности злаковых растений играет и основной компонент растительных фотосистем – хлорофилл, который осуществляет поглощение фотонов и определяет эффективность использования их энергии. Некоторые исследователи полагают, что растения с более высоким уровнем хлорофилла поглощают больше энергии и вследствие этого фотосинтез у них более эффективный [11–16]. Исследование содержания основных фотосинтетических пигментов в листьях тимофеевки луговой проводилось с изучением концентрации хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов (Кар) (таблица 3).

Таблица 3. – Влияние эпикастастерона и его конъюгата на содержание основных фотосинтетических пигментов тимофеевки луговой

Вариант опыта	Хлорофилл <i>a</i>		Хлорофилл <i>b</i>		Каротиноиды	
	(мг/г)	% к контролю	(мг/г)	% к контролю	(мг/г)	% к контролю
Контроль	1,29 ± 0,21	100,0	0,56 ± 0,14	100,0	0,57 ± 0,20	100,0
ЭК	1,61 ± 0,10	124,8	0,64 ± 0,05	114,3	0,57 ± 0,03	100,0
S31	1,42 ± 0,04	110,1	0,57 ± 0,02	101,8	0,50 ± 0,02	87,7

В целом для ЭК и S31 зафиксировано повышение содержания Хл *a* и Хл *b* и понижение содержания каротиноидов относительно контроля. Увеличение содержания хлорофилла *a* при воздействии ЭК составляет 24,8 %, а при воздействии S31 – 10,1 %. Увеличение содержания хлорофилла *b* при воздействии ЭК составляет 14,3 %, а при воздействии S31 – 1,8 %. Содержание каротиноидов при воздействии ЭК находится на одном уровне с контролем, а при воздействии S31 – понижается на 12,3 % относительно контроля (рисунок 1).



1 – ЭК в концентрации 10⁻⁸ М; 2 – S31 в концентрации 10⁻⁸ М

Рисунок 1. – Влияние brassinosteroids на содержание основных фотосинтетических пигментов тимфеевки луговой в лабораторных условиях (% относительно контроля)

В пигментном фонде опытных растений преобладал хлорофилл, его концентрация варьирует в диапазоне от 1,29 мг/г массы для контрольного образца до 1,61 мг/г массы для ЭК. При этом фонд Хл а увеличивался в большей степени, чем Хл b, о чем свидетельствует соотношение хлорофиллов. То, что фонд Хл а увеличивался в большей степени, чем Хл b, отражает становление фотосистем и увеличение числа реакционных центров.

Известно, что при дефиците хлорофилла фотосинтетическая активность тормозится. В исследованиях позитивной роли высокого содержания хлорофилла в листьях пшеницы подтверждается снижение урожайности, сопровождающееся уменьшением количества хлорофиллов в листьях под действием разных стрессов, вызывающих или прекращение синтеза этих пигментов, или их деградацию [17] и, наоборот, наличие положительной корреляции содержания хлорофиллов с урожаем и массой 1 000 зерен [18].

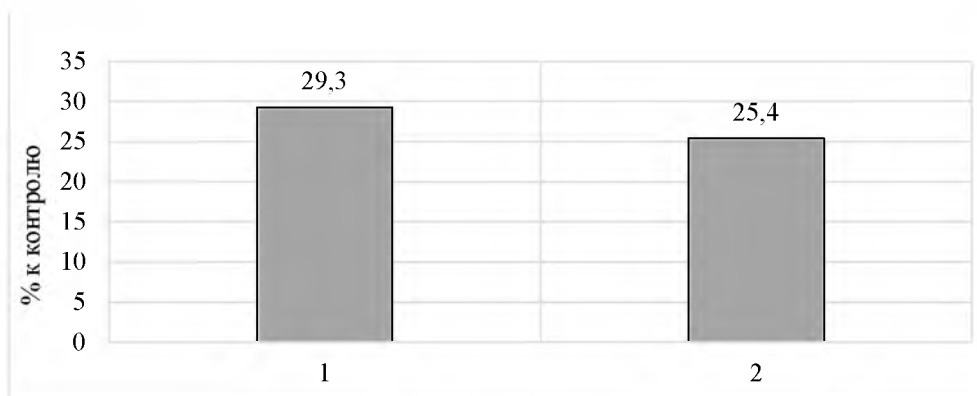
Данные по содержанию белка в надземной части тимфеевки луговой представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Влияние эпикастастерона и его конъюгата на содержание белка в надземных частях тимфеевки луговой

Вариант опыта	Содержание белка	
	мг/г сырой массы	% к контролю
Контроль	20,01 ± 0,20	100,0
ЭК	25,88 ± 0,38**	129,3
S31	25,09 ± 0,23**	125,4

Примечание – ** – достоверно при P ≤ 0,01

Таким образом, при воздействии ЭК и S31 отмечается увеличение содержания белка относительно контроля на 29,3 и 25,4 % соответственно (рисунок 2).



1 – ЭЖ в концентрации 10^{-8} М; 2 – S31 в концентрации 10^{-8} М

Рисунук 2. – Влияние brassinosteroidов на содержание белка тимофеевки луговой в лабораторных условиях, % относительно контроля

По результатам лабораторных исследований нами зафиксирована взаимосвязь увеличения содержания белка с увеличением содержания хлорофиллов, что также коррелирует с повышением биомассы тимофеевки луговой при воздействии ЭЖ и его конъюгата.

Заклучение

Проведено исследование биологической активности 24-эпикастастерона и его конъюгатов в лабораторном эксперименте на морфометрические и биохимические параметры тимофеевки луговой. Показано, что в лабораторных условиях действие 24-эпикастастерона в достаточно широком диапазоне концентраций (10^{-8} – 10^{-11} М) и тетраиндолилацетат 24-эпикастастерона в концентрациях 10^{-9} – 10^{-11} М оказывают стимулирующий эффект в отношении прироста длины корня и длины побега проростков тимофеевки луговой. Наибольший стимулирующий эффект 24-эпикастастерон проявляет в концентрации 10^{-8} М, тетраиндолилацетат 24-эпикастастерона – в концентрации 10^{-9} М.

В вегетационном лабораторном эксперименте предпосевная обработка семян тимофеевки 24-эпикастастероном в концентрации 10^{-8} М способствует увеличению всхожести семян тимофеевки, увеличению длины побега, увеличению массы побегов, увеличению содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и белка в проростках тимофеевки луговой. Предпосевная обработка семян тимофеевки тетраиндолилацетатом 24-эпикастастерона в концентрации 10^{-9} М способствует увеличению длины побега, увеличению массы побегов, увеличению содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и белка в проростках тимофеевки луговой. В общем фонде хлорофилла превалирует хлорофилл *a*. Известно, что часть хлорофилла *a* и весь хлорофилл *b* локализован в антенных комплексах фотосистем. Это означает, что значительная доля зеленых пигментов принадлежит светособирающим комплексам, на долю которых приходится в среднем 55–65 % всего фонда хлорофилла листьев. Полученные нами данные о высокой доле хлорофилла в светособирающих комплексах тимофеевки луговой свидетельствует о повышении интенсивности фотосинтеза и, как вследствие этого теневыносливости и приспособленности к дефициту света при воздействии исследуемых веществ.

Зафиксировано закономерное действие 24-эпикастастерона и его конъюгатов на повышение массы побегов, содержания основных фотосинтетических пигментов и белка при одновременном увеличении морфометрических показателей роста тимофеевки. В лабораторных условиях наибольшей эффективностью и универсальностью действия на растения тимофеевки луговой характеризуется 24-эпикастастерон. Данное со-

единение демонстрирует большой стимулирующий эффект в отношении морфофизиологических и биохимических показателей тимофеевки луговой по сравнению с 2-моно-салицилатом 24-эпикастастерона и тетраиндолилацетатом 24-эпикастастерона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Растениеводство / П. П. Вавилов [и др.] ; под ред. П. П. Вавилова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1986. – 512 с.
2. Фирсов, И. П. Технология растениеводства / И. П. Фирсов, А. М. Соловьев, М. Ф. Трифонова. – М. : КолосС, 2004. – 472 с.
3. Ecophysiology and responses of plants under salt stress / P. Ahmad, M. M. Azooz, M. N. V. Prasad (eds.) // Springer Science + Business Media, 2013. – 520 p.
4. Синтез и стресс-протекторное действие на растения конъюгатов брассиностероидов с салициловой кислотой / Р. П. Литвиновская [и др.] // Химия природ. соединений. – 2016. – № 3. – С. 394–398.
5. Индолил-3-ацетоксипроизводные брассиностероидов: синтез и рострегулирующая активность / Р. П. Литвиновская [и др.] // Химия природ. соединений. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 408–414.
6. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038-84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартиформ, 2011. – 29 с.
7. Методика определения силы роста семян кормовых культур / В. И. Карпин [и др.]. – М. : Изд-во РГАУ – МСХА, 2012. – 16 с.
8. Журбицкий, З. И. Теория и практика вегетационного метода / З. И. Журбицкий. – М. : Наука, 1968. – 260 с.
9. Дуктова, Н. А. Учебная практика по физиологии и биохимии растений : программа и метод. указания / Н. А. Дуктова, А. И. Мыхлык, В. П. Моисеев. – Горки : БГСХА, 2018. – 56 с.
10. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Ураджай, 1973. – 320 с.
11. Dymova, O. Chloroplasts and their role in photosynthesis / O. Dymova, L. Fiedor // Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology. – Syktyvkar, 2014. – P. 140–160.
12. Lawlor, D. W. Musings about the effects of environment on photosynthesis / D. W. Lawlor // Annals of Botany. – 2009. – Vol. 103, nr 4. – P. 543–549.
13. Luo, P. G. Wheat leaf chlorosis controlled by a single recessive gene / P. G. Luo, Z. L. Ren // Physiology and Molecular Biology of Plants. – 2006. – Vol. 32, nr 3. – P. 330–338.
14. Mapping of QTLs controlling chlorophyll content in rice / B. Wang [et al.] // Acta Genetica Sinica. – 2003. – Vol. 30, nr 12. – P. 1127–1132.
15. Heredity, physiology and mapping of a chlorophyll content gene of rice (*Oryza sativa* L.) / F. Wang [et al.] // Journal of Plant Physiology. – 2008. – Vol. 165, nr 3. – P. 324–330.
16. Genetic analysis of grain yield and leaf chlorophyll content in common wheat / K. Zhang [et al.] // Cereal Research Communications – 2009. – Vol. 37, nr 4. – P. 499–511.
17. Ashraf, M. Photosynthesis under stressful environments: An overview / M. Ashraf, P. J. C. Harris // Photosynthetica. – 2013. – Vol. 51, nr 2. – P. 163–190.
18. Прядкина, Г. А. Пигменты фотосинтетического аппарата и продуктивность озимой пшеницы / Г. А. Прядкина, В. В. Моргун // Физиология растений и генетика. – 2016. – Т. 48, № 4. – С. 310–323.

REFERENCES

1. Rastienijevodstvo / P. P. Vavilov [i dr.] ; pod ried. P. P. Vavilova. – 5-je izd., pie-rierab. i dop. – M. : Agropromizdat, 1986. – 512 s.
2. Firsov, I. P. Tiekhnologija rastienijevodstva / I. P. Firsov, A. M. Solov'jov, M. F. Trifonovova. – M. : KolosS, 2004. – 472 s.
3. Ecophysiology and responses of plants under salt stress / P. Ahmad, M. M. Azooz, M. N. V. Prasad (eds.) // Springer Science + Business Media, 2013. – 520 p.
4. Sintez i stress-protektornoje diejstvije na rastienija konjugatov brassinosteroidov s salicilovoj kislotoj / R. P. Litvinovskaja, [i dr.] // Khimija prirod. sojedinenij. – 2016. – № 3. – S. 394–398.
5. Indolil-3-acetoksiiproizvodnyje brassinosteroidov: sintez i rostriegulirujushchaja aktivnost' / R. P. Litvinovskaja [i dr.] // Khimia prirod. sojedinenij. – 2013. – T. 49, № 3. – S. 408–414.
6. Siemiena sel'skokhozjajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielenija vskhozhesti : GOST 12038–84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.
7. Mietodika opriedielenija sily rosta siemian kormovykh kul'tur / V. I. Karpin [i dr.]. – M. : Izd-vo RGAU – MSHA, 2012. – 16 s.
8. Zhurbickij, Z. I. Teorija i praktika viegietacionnogo mietoda / Z. I. Zhurbickij. – M. : Nauka, 1968. – 260 s.
9. Duktova, N. A. Uchiebnaja praktika po fiziologiji i biokhimiji rastenij : programma i mietod. ukazaniya / N. A. Duktova, A. I. Mykhlyk, V. P. Moisiejev. – Gorki : BGSMA, 2018. – 56 s.
10. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Uradzhaj, 1973. – 320 s.
11. Dymova, O. Chloropylls and their role in photosynthesis / O. Dymova, L. Fiedor // Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology. – Syktyvkar, 2014. – P. 140–160.
12. Lawlor, D. W. Musings about the effects of environment on photosynthesis / D. W. Lawlor // Annals of Botany. – 2009. – Vol. 103, nr 4. – P. 543–549.
13. Luo, P. G. Wheat leaf chlorosis controlled by a single recessive gene / P. G. Luo, Z. L. Ren // Physiology and Molecular Biology of Plants. – 2006. – Vol. 32, nr 3. – P. 330–338.
14. Mapping of QTLs controlling chlorophyll content in rice / B. Wang [et al.] // Acta Genetica Sinica. – 2003. – Vol. 30, nr 12. – P. 1127–1132.
15. Heredity, physiology and mapping of a chlorophyll content gene of rice (*Oryza sativa* L.) / F. Wang [et al.] // Journal of Plant Physiology. – 2008. – Vol. 165, nr 3. – P. 324–330.
16. Genetic analysis of grain yield and leaf chlorophyll content in common wheat / K. Zhang [et al.] // Cereal Research Communications – 2009. – Vol. 37, nr 4. – P. 499–511.
17. Ashraf, M. Photosynthesis under stressful environments: An overview / M. Ashraf, P. J. C. Harris // Photosynthetica. – 2013. – Vol. 51, nr 2. – P. 163–190.
18. Priadkina, G. A. Pigmienty fotosintetichieskogo apparata i produktivnost' ozimoj pshenicy / G. A. Priadkina, V. V. Morgun // Fiziologija rastenij i gienetika. – 2016. – T. 48, № 4. – S. 310–323.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 17.03.2022

УДК 612.176

Галина Евгеньевна Хомич*канд. биол. наук, доц., доц. каф. анатомии, физиологии и безопасности человека
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина***Halina Khomich***Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Anatomy, Physiology and Human Safety
of the Brest State A. S. Pushkin University**e-mail: medicine@brsu.brest.by*

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОТВЕТ СЕРДЦА И СОСУДОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА У ЛЮДЕЙ, ПРОЖИВАЮЩИХ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИИ

С помощью методики А. А. Астахова проведено исследование некоторых сосудодвигательных рефлексов крупных вен ног, затрудняющих гравитационную миграцию крови при вертикальном положении и положении вниз головой. Зафиксировано, что у девушек, проживающих на территории, загрязненной радионуклидами, чаще, чем в контрольной группе, наблюдались неадекватные реакции микрососудов, не способные в должной степени предотвратить гравитационное перемещение крови в сосудистом русле при изменении положения тела в пространстве.

***Ключевые слова:** гемодинамические параметры, механизмы регуляции, систолическое артериальное давление.*

Functional Response of Heart and Blood Vessels to Changes in Body Position in People Living in a Radionuclide Contaminated Area

Using the technique of A. A. Astakhov, a study was conducted of some vasomotor reflexes of large leg veins that impede the gravitational migration of blood in an upright position and upside down position. It was recorded that girls living in the territory contaminated with radionuclides more often than in the control group had inadequate reactions of microvessels that could not adequately prevent the gravitational movement of blood when the body position changed.

***Key words:** hemodynamic parameters, mechanisms regulating, systolic blood pressure.*

Введение

Изучение совокупности изменений, произошедших в организме, в т. ч. и в сердечно-сосудистой системе людей, постоянно проживающих на территории с повышенным радиоактивным фоном вследствие Чернобыльской аварии, является важной задачей. Медицинские обследования населения, проживающего на загрязненной местности, показывают, что у подростков и взрослых людей, пострадавших от радиации, резко возрос процент заболеваний сердечно-сосудистой системы. Хроническое облучение малыми дозами радиации негативно влияет на уровень артериального давления и состояние миокарда у студентов, долго живущих в радиационно загрязненных районах.

Изменение уровня фоновой радиации после аварии на Чернобыльской АЭС привело к проблемам прогнозирования последствий и разработки средств профилактики негативного действия хронического низкоинтенсивного радиоактивного излучения на население и окружающую среду. Исследования в данном направлении очень актуальны и интенсивно проводятся в нашей стране и за ее пределами [1–3].

Выброшенные из разрушенного реактора радионуклиды привели к увеличению частоты многих, в т. ч. и сердечно-сосудистых заболеваний [1; 4]. Ионизирующее излучение модифицирует функцию центральных и периферических механизмов адаптации, уменьшает функциональный ответ сердца и сосудов на активацию β -адренергических

рецепторов и повышает его на стимуляцию α -адренорецепторов [5], что приводит к снижению приспособительных реакций со стороны сердечно-сосудистой системы, нарушению нервных и гуморальных механизмов регуляции сократительной деятельности кардиомиоцитов и состояния сосудистого тонуса.

Функциональные пробы с изменением положения тела в пространстве являются специфическими дозированными нагрузками, которые применяют для уточнения генеза некоторых доклинических форм нарушений в состоянии сердечно-сосудистой системы при врачебном обследовании спортсменов [6]. Факторы, вызывающие стойкое повышение или снижение тонуса периферических кровеносных сосудов, во многом обуславливают особенности реакций системы кровообращения на изменение положения тела человека в пространстве.

Одним из таких факторов, по-видимому, является хроническое низкоинтенсивное радиоактивное облучение, т. к. обнаружено, что после продолжительного облучения животных у них усиливаются сократительные и ослабевают реакции расслабления артериальных сосудов [7]. Ионизирующее воздействие на кровеносную сосудистую систему, и в первую очередь на капилляры, зависит от уровня накопления радионуклидов в разных органах и тканях. Имеются данные, свидетельствующие о преимущественно вазоконстрикторном действии малых доз радиации [2], что негативно влияет на кровоснабжение органов и тканей.

На основе имеющихся данных литературы нами исследовалось состояние гемодинамики при выполнении функциональных проб у студенток, проживавших и не проживавших в зоне радиационного контроля.

Материалы и методы исследования

В группу для исследования вошли студентки-первокурсницы, которые непосредственно до поступления в Брестский государственный университет более десяти лет проживали в Лунинецком и Столинском районах Брестской области на местности, имеющей радиоактивное загрязнение по цезию-137 от 1 до 5 Кюри на км². Контрольную группу составили студентки, не проживавшие и не находившиеся продолжительное время в зоне радиоактивного контроля.

По методике А. А. Астахова [8] на многофункциональном мониторе кровенаполнения «Кентавр-1» проводился импедансометрический мониторинг амплитуд револны пальца (АРП) ноги и амплитуд револны голени (АРГ) в состоянии покоя и при выполнении функциональных проб. Функциональными пробами для обследуемых студенток являлись: 1) ортостатическая проба; 2) клиноростатическая проба; 3) нахождение тела в течение одной минуты в положении вниз головой под углом 30 ° к горизонту.

Результаты и их обсуждение

Данные проведенных нами исследований показали, что в горизонтальном положении в состоянии покоя тонус микрососудов нижних конечностей был разным как у студенток контрольной, так и обследуемой группы. Согласно данным литературы [9], значения АРП в диапазоне 60–120 мОм, а АРГ в пределах 80–120 мОм свидетельствуют о нормальном тонусе мелких и магистральных кровеносных сосудов. Снижение величин АРП ниже 40 мОм, а АРГ ниже 60 мОм указывает на уменьшение просвета и повышение тонуса кровеносных сосудов. При спазматическом состоянии сосудов АРП падает ниже 20 мОм. Увеличение показателей АРП и АРГ выше 120 мОм является признаком снижения тонуса кровеносных сосудов и начала развития гипотонической реакции.

Дальнейшие исследования показали, что в горизонтальном положении в состоянии покоя у девушек, много лет проживавших на местности, загрязненной радионукли-

дами, достоверно реже, чем в контроле, наблюдался нормальный тонус кровеносных сосудов нижних конечностей. Так, в обследуемой группе нормальный тонус микрососудов обнаруживался у 33,3 %, магистральных сосудов – у 50,0 % студенток; пониженный тонус микрососудов – у 38,9 %, магистральных сосудов – у 22,2 %; повышенный тонус микрососудов – у 27,8 %, магистральных сосудов – у 27,8 % студенток. В контрольной группе нормальный тонус микрососудистого русла наблюдался у 60,0 % человек, магистральных сосудов – у 65,0 %; пониженный тонус микрососудов и магистральных сосудов был выявлен у 15,0 % девушек; повышенный тонус микрососудов – у 25,0 %, а магистральных кровеносных сосудов – у 20,0 % студенток.

Кроме того, мы обнаружили зависимость постуральных реакций от исходного тонуса периферических кровеносных сосудов. В таблице 1 представлены значения, являющиеся средними для АРП в покое и при изменении положения тела в пространстве у студенток, проживавших и никогда не проживавших в районах радионуклидного загрязнения и имевших в горизонтальном положении в покое пониженный тонус мелких кровеносных сосудов нижних конечностей.

Как видно из таблицы 1, в состоянии покоя в горизонтальном положении у девушек контрольной группы АРП равнялось $178,5 \pm 1,3$ мОм. У студенток обследуемой группы значения АРП были достоверно выше и составляли $197,9 \pm 1,2$ мОм (таблица 1, серия 2), что говорит о более выраженной по сравнению с контрольной группой вазодилатации микрососудистого русла нижних конечностей.

Таблица 1. – Амплитуда револны пальца (АРП) у девушек с пониженным тонусом микрососудов нижних конечностей при выполнении функциональных проб

№ серии	Серия опытов	Кол-во опытов	Кол-во измерений	АРП (мОм)	
				$\bar{x} \pm S_x$	P
1	Горизонтальное положение в покое (контрольная группа)	19	2 321	$178,5 \pm 1,3$	
2	Горизонтальное положение в покое (обследуемая группа)	43	5 532	$197,9 \pm 1,2$	<0,001**
3	Ортостатическая проба (контрольная группа)	9	3 728	$53,4 \pm 1,5$	<0,001*
4	Ортостатическая проба (обследуемая группа)	21	6 844	$96,1 \pm 1,7$	<0,001* <0,001**
5	Клиностатическая проба (контрольная группа)	9	1 912	$176,7 \pm 2,0$	>0,05*
6	Клиностатическая проба (обследуемая группа)	22	5 428	$167,9 \pm 2,3$	<0,001* <0,01**
7	Положение головой вниз (контрольная группа)	9	586	$162,5 \pm 1,7$	<0,001*
8	Положение головой вниз (обследуемая группа)	21	1 378	$99,2 \pm 2,8$	<0,001* <0,001**

Примечание – * – различия по отношению к покою; ** – различия по отношению к аналогичной серии контрольной группы.

Проведенная функциональная ортостатическая проба привела к констрикторным компенсаторным реакциям мелких кровеносных сосудов ног у девушек обеих групп (таблица 1, серии 3, 4). Вместе с тем сосудосуживающие рефлексy, препятствующие гравитационному оттоку крови к ногам, лучше осуществлялись у студенток, не проживающих на местности с повышенным радиоактивным фоном, что проявлялось в изменениях

средних значений АРП. Так, в контрольной группе перемещение девушек в вертикальное положение вызывало уменьшение АРП на 70,1 %, в результате чего начиная с третьей минуты нахождения девушек в ортоположении значения АРП становились равными $53,4 \pm 1,5$ мОм. Эти данные свидетельствуют о переходе мелких кровеносных сосудов из гипотонического состояния сначала в нормотоническое, а затем, с 3-й минуты выполнения пробы, в состояние, пограничное с гипертензивным. На основании результатов параллельного измерения частоты сердечных сокращений и систолического артериального давления можно предположить о наличии почти удовлетворительной компенсаторной антигравитационной реакции со стороны микрососудов на ортостатическую пробу.

В исследуемой группе переход в вертикальное положение вызывал у девушек снижение АРП на 61,4 %, значения которой на 4–10 минутах нахождения в ортоположении оказались равными $96,1 \pm 1,7$ мОм. Однако в этом случае, судя по значениям АРП, диаметр мелких кровеносных сосудов ног оставался довольно большим, и при выполнении ортостатической пробы в кровяном русле происходил застой крови, который был вызван гравитационным воздействием. В результате резко падало систолическое артериальное давление в верхней половине тела, на основании чего можно считать неудовлетворительной компенсаторную антигравитационную вазоконстрикторную реакцию сосудов нижних конечностей у девушек, долгие годы проживавших в зоне радиационного загрязнения.

Затем, после 10-минутного нахождения в вертикальном положении студентки выполняли клиностатическую пробу, что приводило к значительному увеличению по сравнению с ортоположением показателей АРП, которые начинали приближаться к уровню покоя к началу 2-й минуты, а в обследуемой группе – к началу 3-й минуты пробы (таблица 1, серии 5, 6).

Возвращение показателей АРП до уровня покоя и 5-минутный отдых давали основание для перевода девушек в положение вниз головой под углом 30° к горизонту. В контрольной группе на протяжении 1-минутного нахождения студенток в положении головой вниз наблюдалось относительно минимальное снижение величины АРП на 9,0 %. Однако главным, на наш взгляд, является то, что на фоне исходного гипотонического состояния микрососудов подавляются их способности к дальнейшему расширению просвета и депонированию крови. Поэтому мелкие сосуды ног не только не участвуют в компенсаторном депонировании крови, препятствующем ее гравитационному венозному оттоку к сердцу, но даже в некоторой степени сужаются, что проявляется в снижении по сравнению с уровнем покоя значений АРП (таблица 1, серия 7).

Почти такая же (только более выраженная) реакция наблюдалась у студенток обследуемой группы. Было установлено, что при нахождении в положении головой вниз под углом 30° к горизонту среднее значение АРП уменьшалось на 49,9 % (таблица 1, серия 8). Это свидетельствует, во-первых, о значительном сужении просвета мелких кровеносных сосудов ног и уменьшении в них количества крови, и, во-вторых, об отсутствии компенсаторных сосудорасширяющих реакций микрососудов, направленных на предотвращение гравитационного оттока крови от нижних конечностей к верхней половине тела.

Следующим этапом наших гемодинамических обследований явилось изучение периферической гемодинамики у девушек, имевших в горизонтальном положении в состоянии покоя повышенный тонус мелких кровеносных сосудов нижних конечностей. Средние значения АРП в покое и при изменении положения тела в пространстве у студенток, длительно проживавших и не проживавших на местности с увеличенным радиоактивным фоном, представлены в таблице 2. Было установлено, что в состоянии покоя

в горизонтальном положении значения АРП достоверно не различались у девушек контрольной и обследуемой групп (таблица 2, серии 1, 2). Низкие амплитуды револвны пальца ноги и у одной, и у другой групп свидетельствуют о состоянии мелких кровеносных сосудов ног, близких к спазматическому. Выполнение ортостатической пробы вызывало еще большее существенное сужение микрососудов нижних конечностей, и это отразилось в уменьшении значений АРП.

Таблица 2. – Амплитуда револвны пальца (АРП) у девушек с повышенным тонусом микрососудов нижних конечностей при выполнении функциональных проб

№ серии	Серия опытов	Кол-во опытов	Кол-во измерений	АРП (мОм)	
				$\bar{x} \pm S_x$	P
1	Горизонтальное положение в покое (контрольная группа)	30	4 214	$26,2 \pm 0,9$	
2	Горизонтальное положение в покое (обследуемая группа)	30	4 247	$24,9 \pm 1,2$	>0,05**
3	Ортостатическая проба (контрольная группа)	15	5 423	$19,7 \pm 1,2$	<0,01*
4	Ортостатическая проба (обследуемая группа)	15	5 351	$20,2 \pm 1,3$	<0,05* >0,05**
5	Клиностатическая проба (контрольная группа)	15	3 965	$28,9 \pm 1,4$	>0,05*
6	Клиностатическая проба (обследуемая группа)	15	3 893	$25,7 \pm 1,5$	>0,05* >0,05**
7	Положение головой вниз (контрольная группа)	15	1 016	$30,8 \pm 1,5$	<0,05*
8	Положение головой вниз (обследуемая группа)	15	1 047	$26,3 \pm 1,6$	>0,05* <0,05**

*Примечание – * – различия по отношению к покою; ** – различия по отношению к аналогичной серии контрольной группы.*

Нами было обнаружено, что в контрольной группе, начиная с третьей минуты нахождения студенток в вертикальном положении, средняя величина АРП снижалась на 24,8 % (таблица 2, серия 3), а в обследуемой группе – на 18,9 % (таблица 2, серия 4).

Дальнейшее выполнение клиностатической пробы приводило к достаточно быстрому возрастанию средних значений АРП, которые уже на 2-й минуте после принятия из вертикального горизонтальное положение достоверно не отличались от уровня покоя как в контрольной, так и в обследуемой группе (таблица 2, серии 5, 6).

Непредсказуемой оказалась реакция микрососудистого русла ног в положении тела головой вниз под углом 30° к горизонту. У обследуемых девушек из контрольной группы выполнение данной функциональной пробы вызывало увеличение средних значений АРП по сравнению с уровнем покоя на 17,6 % (таблица 2, серия 7). Однако судя по очень малым показателям АРП ($30,8 \pm 1,5$ мОм) микрососуды ног оставались в суженном состоянии, что значительно снижало их возможности к депонированию крови и воспрепятствованию гравитационного венозного притока крови к сердцу во время положения тела вниз головой.

Касательно студенток обследуемой группы, получили следующие результаты: у них переход тела в наклонное положение не вызывал достоверного изменения АРП (таблица 2, серия 8). Из этого следует, что микрососуды нижних конечностей совсем не принимали участия в компенсаторных реакциях перераспределения крови при

выполнении указанной функциональной пробы, и это усложняло функционирование других звеньев сердечно-сосудистой системы.

Таким образом, на основании результатов, полученных при исследовании тонуса мелких кровеносных сосудов в покое и при выполнении функциональных проб, можно заключить, что у девушек, более 10 лет проживавших в районах радионуклидного загрязнения, слабее проявляются компенсаторные сосудодвигательные рефлексы, препятствующие гравитационному перемещению крови в сосудистом русле при изменении положения тела в пространстве.

Наряду с изучением вазомоторных реакций микрососудистого русла, нами также исследовались постуральные сосудодвигательные рефлексы магистральных кровеносных сосудов. В таблице 3 представлены результаты, полученные при исследовании особенностей указанных рефлексов у девушек, имевших в горизонтальном положении в состоянии покоя пониженный тонус магистральных сосудов.

В результате исследований было установлено, что в состоянии покоя в горизонтальном положении у студенток контрольной группы АРГ равнялась $129,3 \pm 1,5$ мОм (таблица 3, серия 1). В обследуемой группе средняя величина АРГ была достоверно выше и составляла $137,1 \pm 1,3$ мОм (таблица 3, серия 2), что можно расценивать как признак большей вазодилатации, чем в контрольной группе, магистральных сосудов нижних конечностей.

Таблица 3. – Амплитуда револны голени (АРГ) у девушек с пониженным тонусом магистральных сосудов нижних конечностей при выполнении функциональных проб

№ серии	Серия опытов	Кол-во опытов	Кол-во измерений	АРГ (мОм)	
				$\bar{x} \pm S_x$	P
1	Горизонтальное положение в покое (контрольная группа)	18	2 756	$129,3 \pm 1,5$	
2	Горизонтальное положение в покое (обследуемая группа)	25	3 119	$137,1 \pm 1,3$	<0,001**
3	Ортостатическая проба (контрольная группа)	9	3 812	$46,4 \pm 1,6$	<0,001*
4	Ортостатическая проба (обследуемая группа)	13	5 124	$61,3 \pm 1,5$	<0,001* <0,001**
5	Клиностатическая проба (контрольная группа)	9	2 245	$131,6 \pm 1,9$	>0,05*
6	Клиностатическая проба (обследуемая группа)	13	3 384	$141,5 \pm 1,6$	<0,05* <0,001**
7	Положение головы вниз (контрольная группа)	9	635	$191,0 \pm 2,1$	<0,001*
8	Положение головы вниз (обследуемая группа)	12	848	$163,9 \pm 2,2$	<0,001* <0,001**

Примечание – * – различия по отношению к покою; ** – различия по отношению к аналогичной серии контрольной группы.

Перемещение девушек в вертикальное положение вызывал сужение кровеносного русла голени, что отражалось в значительном уменьшении показателей АРГ как в контрольной, так и в обследуемой группе (таблица 3, серии 3, 4). Это свидетельствует о сужении магистральных сосудов сначала до нормального их диаметра, а к 3-й минуте выполнения ортостатической пробы, до состояния повышенного тонуса, что является компенсаторной сосудодвигательной реакцией, препятствующей гравитационному застою крови в сосудах ног при вертикальном положении тела.

В группе испытуемых, выбранных для исследования, выполнение ортостатической пробы приводило к снижению АРГ на 55,3 %, значения которой на 3–10 минутах нахождения в вертикальном положении становились равными $61,3 \pm 1,5$ мОм. В данном случае, судя по значениям АРГ, просвет магистральных сосудов голени оставался достаточно большим, и в них депонировалось большое количество крови. Измерение систолического артериального давления в этот период показало его резкое падение в верхней половине тела. Мы полагаем, что сосудосуживающая компенсаторная реакция магистральных сосудов нижних конечностей у студенток, долго проживавших в районах радионуклидного загрязнения, оказывалась недостаточной для предотвращения гравитационного оттока крови в кровеносные сосуды нижних конечностей.

По истечении 10-минутного нахождения в вертикальном положении девушки выполняли клиностатическую пробу. При этом было установлено, что переход в горизонтальное положение вызывал значительное увеличение, по сравнению с ортоположением, показателей АРГ. На 2-й минуте после перехода в горизонтальное положение среднее значение АРГ у студенток, не находившихся в зоне радионуклидного загрязнения, достоверно не отличалось от уровня покоя (таблица 3, серия 5). У девушек, более 10 лет проживавших на местности с повышенным радиоактивным фоном, на 2-й минуте выполнения клиностатической пробы показатели АРГ были достоверно выше (таблица 3, серия 6), чем в покое до выполнения функциональных проб. Восстановление к исходным показателям происходило к концу 3-й минуты.

После полного восстановления и 5-минутного отдыха производили следующую манипуляцию: с помощью поворотного стола девушек переводили в положение головой вниз под углом 30° к горизонту. При данной нагрузке у студенток обеих групп наблюдалось увеличение диаметра и кровенаполнения магистральных сосудов голени, проявляющееся в довольно большом возрастании значений АРГ.

Так, в контрольной группе наблюдалось увеличение величины АРГ на 47,7 %, или на 61,7 мОм (таблица 3, серия 7). Это свидетельствовало о значительном депонировании крови в магистральных сосудах нижних конечностей, что, по-видимому, является вполне адекватной антигравитационной компенсаторной реакцией, препятствующей чрезмерному притоку крови к сердцу и верхней части тела, находившейся в условиях данной пробы ниже уровня горизонта.

У той же обследуемой группы в положении вниз головой так же, как и в контрольной группе, происходило увеличение диаметра кровеносных сосудов голени по сравнению с наблюдавшимся в покое в горизонтальном положении. Об этом свидетельствовало повышение значений АРГ на 19,5 %, или на 26,8 мОм (таблица 3, серия 8). Однако такая небольшая вазодилатация магистральных сосудов голени недостаточна для предотвращения гравитационного притока крови к сердцу и головной части тела.

Довольно специфические результаты были получены при характеристике сосудодвигательных реакций у студенток, имевших в горизонтальном положении в состоянии покоя повышенный тонус магистральных сосудов нижних конечностей. Нами было выявлено, что в горизонтальном положении в состоянии покоя величина АРГ в контрольной группе была достоверно выше, чем в обследуемой (таблица 4, серии 1, 2). Вместе с тем низкие значения АРГ в обеих группах указывают на выраженную вазоконстрикцию магистральных сосудов голени и на недостаточное их участие в депонировании крови.

Таблица 4. – Амплитуда револны голени у девушек с повышенным тонусом магистральных сосудов нижних конечностей при выполнении функциональных проб

№ серии	Серия опытов	Кол-во опытов	Кол-во измерений	АРГ (мОм)	
				$\bar{x} \pm S_x$	P
1	Горизонтальное положение в покое (контрольная группа)	24	3 381	$47,3 \pm 1,1$	
2	Горизонтальное положение в покое (обследуемая группа)	30	4 508	$38,4 \pm 1,2$	<0,001**
3	Ортостатическая проба (контрольная группа)	12	5 117	$28,5 \pm 1,5$	<0,001* <0,001**
4	Ортостатическая проба (обследуемая группа)	15	5 719	$29,7 \pm 1,6$	<0,001* >0,05**
5	Клиностатическая проба (контрольная группа)	12	3 561	$48,1 \pm 1,3$	>0,05*
6	Клиностатическая проба (обследуемая группа)	15	4 114	$39,9 \pm 1,4$	>0,05* <0,001**
7	Положение головой вниз (контрольная группа)	12	812	$79,4 \pm 1,6$	<0,001*
8	Положение головой вниз (обследуемая группа)	15	985	$56,7 \pm 1,7$	<0,001* <0,001**

Примечание – * – различия по отношению к покою; ** – различия по отношению к аналогичной серии контрольной группы.

Функциональная ортостатическая проба вызвала еще большее сужение кровеносных сосудов, о чем свидетельствовало достоверное уменьшение АРГ. У девушек контрольной группы с 3-й минуты нахождения в вертикальном положении среднее значение АРГ снижалось на 39,7 % (таблица 4, серия 3), а в обследуемой группе – на 22,7 % (таблица 4, серия 4). Следует отметить, что в результате такой вазоконстрикции кровенаполнение крупных сосудов нижних конечностей становилось примерно одинаковым у студенток обеих групп, на что указывало отсутствие при данной пробе существенных различий ($P > 0,05$) между показателями АРГ в контрольной и обследуемой группах. Также можно предположить, что величина наблюдаемой сосудодвигательной реакции при малом исходном диаметре сосудов вполне достаточна для уменьшения гравитационного оттока крови от сердца при вертикальном положении тела.

Выполнение клиностатической пробы приводило к достаточно быстрому увеличению средних значений АРГ, которые уже на второй минуте пробы достоверно не отличались от наблюдавшихся в состоянии покоя как в контрольной, так и в обследуемой группах (таблица 4, серии 5, 6).

Вазомоторная реакция магистральных сосудов голени на перевод студенток в положение вниз головой оказалась одинаково направленной у студенток обеих групп. Так, в контрольной группе выполнение данной функциональной пробы вызывало увеличение значений АРГ по сравнению с уровнем покоя на 67,9 % (таблица 4, серия 7). Вместе с тем, фактические значения АРГ ($79,4 \pm 1,6$ мОм) только приближались к нижнему пределу нормы, характерной для горизонтального положения. Это дает основание считать, что крупные кровеносные сосуды при положении тела вниз головой почти не участвуют в антигравитационном компенсаторном перераспределении крови.

Такая же картина наблюдалась у студенток обследуемой группы. В положении вниз головой значения АРГ увеличивались по сравнению с уровнем покоя на 47,7 % (таблица 4, серия 8) и становились равными $56,7 \pm 1,7$ мОм. Однако, согласно [9], такие по-

казатели АРГ наблюдаются при повышенном тоне и констрикторном состоянии крупных кровеносных сосудов нижних конечностей. Принимая во внимание, что у многих девушек, имевших в покое повышенный тонус кровеносных сосудов голени, в положении вниз головой не происходило увеличение амплитуды револны пальца (таблица 2, серия 8), можно сделать вывод о недостаточном участии кровеносных сосудов нижних конечностей в компенсаторных антигравитационных вазомоторных реакциях. В результате при этой пробе у студенток обследуемой группы наблюдались резкие скачки систолического артериального давления.

После перевода обследуемой студентки из вертикального в горизонтальное положение сначала наблюдалось небольшое и кратковременное увеличение АРП и АРГ выше уровня покоя, а затем происходило восстановление этих показателей до первоначальных значений.

Заключение

Таким образом, на основании результатов, полученных при исследовании функционального состояния магистральных кровеносных сосудов нижних конечностей с использованием различных функциональных проб, можно заключить, что у девушек, много лет проживавших на местности, загрязненной радионуклидами, чаще, чем в контрольной группе, обнаруживаются отклонения от нормы тонуса этих сосудов. Поэтому в обследуемой группе часто выявлялась недостаточность компенсаторных вазомоторных реакций сосудов голени, направленных на уменьшение гравитационного перемещения крови в сосудистом русле при изменении положения тела в пространстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гофман, Дж. Чернобыльская авария: радиационные последствия для настоящего и будущего поколений / Дж. Гофман. – Минск : Высш. шк., 2014. – 574 с.
2. Структурно-функциональные эффекты инкорпорированных в организм радионуклидов / Ю. И. Бандажевский [и др.]. – Гомель : ГГМУ, 2017. – 156 с.
3. Характеристика периферической гемодинамики у детей, подвергшихся комбинированному радиационно-химическому воздействию / А. Н. Аринчин [и др.] // Десять лет после Чернобыльской катастрофы (научные аспекты проблемы) : тез. докл. междунар. науч. конф. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь ; Науч.-исслед. клинич. ин-т радиац. медицины и экологии. – Минск, 1996. – С. 14.
4. Проблемы заболеваемости эвакуированного населения Беларуси / С. И. Антипова [и др.] // Десять лет после Чернобыльской катастрофы (научные аспекты проблемы) : тез. докл. междунар. науч. конф. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь ; Науч.-исслед. клинич. ин-т радиац. медицины и экологии. – Минск, 1996. – С. 12.
5. Лобанок, Л. М. Модификация механизмов нейрогуморальной регуляции сердечно-сосудистой системы под воздействием низкоинтенсивных ионизирующих излучений / Л. М. Лобанок // X съезд Белорус. о-ва физиологов, Минск, 3–4 сент. 2001 г. : тез. докл. / НАН Беларуси ; М-во образования Респ. Беларусь ; редкол.: В. Н. Калюнов [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2011. – С. 92–93.
6. Баевский, Р. М. Ритмы сердца у спортсменов / Р. Е. Мотылянская, Р. М. Баевский. – М., 2016. – 143 с.
7. Соловьева, Н. Г. Эффекты острого и пролонгированного гамма-облучения в малых дозах на функциональные характеристики кровеносных сосудов неполовозрелых крыс / Н. Г. Соловьева // Фундаментальные и прикладные аспекты радиобиологии: биологические эффекты малых доз радиации и радиоактивное загрязнение среды : тез. докл.

международ. науч. конф., Минск, 23–24 апр. 2018 г. / Ин-т радиобиологии НАН Беларуси ; редкол.: Е. Ф. Конопля [и др.]. – Минск, 2018. – С. 231.

8. Астахов, А. А. Многофункциональный импедансный мониторинг сердечно-сосудистой системы и легких / А. А. Астахов. – Челябинск, 1989. – 18 с.

9. Виноградова, Т. С. Инструментальные методы исследования сердечно-сосудистой системы / Т. С. Виноградова. – М. : Медицина, 1986. – 416 с.

REFERENCES

1. Gofman, Dzh. Chiernobyl'skaja avarija: radiacionnyje posledstvija dlja nastojashchego i budushchego pokolienij / Dzh. Gofman. – Minsk : Vyssh. shk., 2014. – 574 s.

2. Strukturno-funkcional'nyje effiektory inkorporirovannykh v organizm radionuklidov / Yu. I. Bandazhevskij [i dr.]. – Gomel' : GGMU, 2017. – 156 s.

3. Kharakteristika pierifierichieskoj giemodinamiki u dietiej, podviergshixsia kombinirovannomu radiacionno-khimichieskomu vozdeystviyu / A. N. Arinchin [i dr.] // Desiat' liet poslie Chiernobyl'skoj katastrofy (nauchnyje aspiekty problimy) : tez. dokl. miezhdunar. nauch. konf. / M-vo zdavookhranienija Riesz. Bielarus' ; Nauch.-isslied. klinich. in-t radiac. miediciny i ekologii. – Minsk, 1996. – S. 14.

4. Problemy zabolievajemosti evakuirovannogo naselienija Bielarusi / S. I. Antipova [i dr.] // Desiat' liet poslie Chiernobyl'skoj katastrofy (nauchnyje aspiekty problimy) : tez. dokl. miezhdunar. nauch. konf. / M-vo zdavookhranienija Riesz. Bielarus' ; Nauch.-isslied. klinich. in-t radiac. miediciny i ekologii. – Minsk, 1996. – S. 12.

5. Lobanok, L. M. Modifikacija miekhanizmov nejrogumoral'noj rieguliacii sierdiechno-sosudistoj sistiemy pod vozdeystviem nizkointensivnykh ionizirujushchikh izluchienij / L. M. Lobanok // X sjezd Bielorus. o-va fiziologov, Minsk, 3–4 sient. 2001 g. : tez. dokl. / NAN Bielarusi ; M-vo obrazovanija Riesz. Bielarus' ; riedkol.: V. N. Kaliunov [i dr.]. – Minsk : Biznesofset, 2011. – S. 92–93.

6. Bajevskij, R. M. Ritmy sierdca u sportsmienov / R. M. Bajevskij. R. Ye. Motylian-skaja, – M., 2016. – 143 s.

7. Solov'jova, N. G. Effiektory ostrogo i prolongirovannogo gamma-obluchienija v malykh dozakh na funkcional'nyje kharakteristiki krovienosnykh sosudov niepolovozrielykh krysv / N. G. Solov'jeva // Fundamental'nyje i prikladnyje aspiekty radiobiologii: biologichieskije effiektory malykh doz radiacii i radioaktivnoje zagriaznienije sriedy : tez. dokl. miezhdunar. nauch. konf., Minsk, 23–24 apr. 2018 g. / In-t radiobiologii NAN Bielarusi ; riedkol.: Ye. F. Konoplia [i dr.]. – Minsk, 2018. – S. 231.

8. Astakhov, A. A. Mnogofunkcional'nyj impiedansnyj monitoring sierdiechno-sosudistoj sistiemy i liogkikh / A. A. Astakhov. – Cheliabinsk, 1989. – 18 s.

9. Vinogradova, T. S. Instrumentalnyje mietody issliedovanija sierdiechno-sosudistoj sistiemy / T. S. Vinogradova. – M. : Miedicina, 1986. – 416 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 18.11.2021

УДК 577.175.1: 57.084.5

**Яна Валерьевна Хомюк¹, Александр Петрович Колбас²,
Раиса Павловна Литвиновская³**

¹магистр биол. наук, аспирант 3-го года обучения каф. химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²канд. биол. наук, доц., нач. Центра экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

³д-р хим. наук, гл. науч. сотрудник
Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси

Yana Khamiuk¹, Aliaksandr Kolbas², Raisa Litvinovskaya³

¹Master of Biological Sciences,
3-rd Year Post-Graduate Student of the Department of Chemistry
of the Brest State A. S. Pushkin University

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Ecology Center
of the Brest State A. S. Pushkin University

³Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher at the Laboratory of Steroid Chemistry
at the Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus
e-mail: 1archibasovayana@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЭПИБРАССИНОЛИДА И ЕГО ЭФИРОВ С СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ НА РОСТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ И БИОМАССУ *TRIFOLIUM PRATENSE* L.

Впервые изучено действие 24-эпибрассинолида и его натриевых солей эфиров с серной кислотой на длину корней и побегов, а также биомассу клевера лугового в зависимости от условий выращивания и типов обработки. В опытах на беспочвенной среде действие конъюгатов 24-эпибрассинолида на начальный рост растений в концентрациях 10^{-11} – 10^{-9} М оказалось незначительным (за исключением динатрий 2,3-дисульфата 24-эпибрассинолида), в большей степени активность изученных соединений проявилась в лабораторном опыте в почвенной культуре. Отмечается увеличение активности изученных соединений при воздействии факторов окружающей среды. В полевых условиях отмечено достоверное влияние на длину надземных органов растения. Сравнение типов обработки в течение двух вегетационных сезонов выявило преимущество внекорневого внесения брассиностероидов и их производных. Показано, что наиболее эффективным и универсальным конъюгатом для клевера лугового по исследуемым параметрам для двух типов обработки (замачивание семян и опрыскивание растений) является динатрий 2,3-дисульфат 24-эпибрассинолида.

Ключевые слова: брассиностероиды, 24-эпибрассинолид, эфиры ЭБ с серной кислотой, конъюгаты брассиностероидов, клевер, рострегулирующая активность, биомасса.

The Effect of Epibrassinolide and its Sulfuric Acid Esters on the Morphometric Parameters and Biomass of Trifolium Pratense L.

The effect of 24-epibrassinolide and its sodium salts of esters with sulfuric acid on the length of roots and shoots, as well as the biomass of clover, depending on growing conditions and types of processing, was studied for the first time. There is a change in the activity of the studied compounds with an increase in the effect of environmental factors. In experiments on a groundless medium, the effect of epibrassinolide conjugates on the initial growth of plants at concentrations of 10^{-11} – 10^{-9} M turned out to be insignificant (with the exception of disodium 2,3-disulfate 24-epibrassinolide) to a greater extent the activity of the studied compounds was manifested in laboratory experiments in soil culture. In the field conditions, a significant effect on the length of aboveground organs was noted. Comparison of treatment types during two growing seasons revealed the advantage of foliar application of brassinosteroids and their derivatives. It is shown that the most effective and universal conjugate for meadow glue according to the studied parameters for two types of treatment (pre-sowing seeds treatment and spraying plants) is disodium 2,3-disulfate 24-epibrassinolide.

Key words: brassinosteroids, 24-epibrassinolide, esters of EB with sulfuric acid, brassinosteroid conjugates, clover, growth regulating activity, biomass.

Введение

Клевер луговой имеет большое сельскохозяйственное значение и является главной бобовой кормовой культурой в полевых севооборотах Республики Беларусь. В зависимости от фазы развития при сборе урожая его используют для приготовления сена и сенажа, как сидерат в плане снабжения почвы азотом, а также в качестве медоносной культуры. К недостаткам при возделывании данной культуры можно отнести слабую устойчивость к заболеваниям (корневая гниль, увядание, фузариоз, ржавчина и т. д.) и слабую адаптивность к меняющимся условиям произрастания, а также низкую способность конкурировать с сорными растениями. В связи с этим актуальным является использование экологически безопасных средств повышения продуктивности и стрессоустойчивости клевера лугового.

Ранее проведенные исследования описывают положительное влияние brassinosteroidов (БС) на повышение роста, урожайности и биологической ценности растений, на функциональное состояние фотосинтетического аппарата и количество пигментов, а также вовлечение их в регуляцию формирования защитных систем растений [1–4]. В настоящее время большой интерес представляет изучение биологической активности конъюгатов brassinosteroidов. Получены положительные результаты стресс-протекторного и защитного действия некоторых конъюгатов БС на растения, подвергнутые биотическому стрессу [5].

Полученные данные о воздействии конъюгатов фитогормонов с различными биологически значимыми органическими кислотами стали причиной интереса к сульфопроизводным БС. Описано по меньшей мере 8 путей метаболических преобразований БС [6]. Одним из них является сульфатирование сульфотрансферазами, которое предполагает инактивацию БС [7], или, наоборот, необходимый этап для проявления биологического эффекта [8]. Недавно в Институте биоорганической химии НАН Беларуси был синтезирован ряд водорастворимых сульфатов 24-эпибрасинолида [9].

Целью данного исследования является поэтапное исследование биологической активности 24-эпибрасинолида и его конъюгатов с серной кислотой на ростовые параметры и биомассу клевера лугового *Trifolium pratense* L. в зависимости от условий выращивания и типов обработки.

Материалы и методы

24-Эпибрасинолид, натриевые соли 2-, 3-, 22- и 23-моносulfатов ЭБ (2-нс, 3-нс, 22-нс, 23-нс) и 2,3-дисulfата ЭБ (2,3-дндс) (конъюгаты) синтезированы в Лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси и предоставлены для данного исследования. В работе использованы семена клевера лугового *Trifolium pratense* L. (ОАО «МинскСортСемОвощ»).

Определение эффективных концентраций ЭБ и его конъюгатов в лабораторных условиях на беспочвенной среде.

Обработка исследуемыми веществами проводилась однократно в виде предварительного замачивания семян на 5 часов. Изучен диапазон наиболее характерных для действия БС концентраций 10^{-9} – 10^{-11} М. Изучение морфометрических параметров клевера проводили согласно ГОСТу 12038-84 [10]. Проращивание проводилось на фильтровальной бумаге в термостате при 25 °С, в темноте, по истечении трех суток фиксировали энергию прорастания семян, через семь суток определяли всхожесть, среднюю длину корней и побегов проростков клевера [11]. В результате проведенных опытов были отобраны эффективные концентрации ЭБ и каждого из его конъюгатов для дальнейших исследований.

Определение воздействия ЭБ и его конъюгатов на клевер луговой в вегетационном лабораторном эксперименте при различных способах обработки.

В лабораторных условиях на почвенной среде [12; 13] были протестированы два способа обработки растений гормонами в отобранных концентрациях: предпосевная (замачивание семян) и внекорневая обработка (опрыскивание растений). При предпосевной обработке семена замачивали в растворах ЭБ и его конъюгатов в течение 5 ч, далее высаживали в пластиковые контейнеры $9 \times 9 \times 8$ см на универсальном почвогрунте («Хозяин, Карио», Республика Беларусь) и выращивали при $22\text{--}25$ °С в лабораторных условиях вегетационного эксперимента в течение месяца. При внекорневой обработке семена высаживались в контейнеры без обработки, внесение исследуемых соединений проводили путем опрыскивания растений. Внекорневая обработка проводилась дважды – на стадии всходов растений (6-й день) и на стадии первого настоящего тройчатого листа (15-й день). Временные рамки были установлены нами опытным путем при выращивании клевера в условиях лабораторного вегетационного опыта. В качестве формы контроля растения выращивали с обработкой дистиллированной водой. Фиксировались значения длины подземной (корней) и надземной (побегов) частей клевера лугового, а также их массы (сырая и воздушно-сухая).

Определение воздействия ЭБ и его конъюгатов на клевер луговой в полевом эксперименте при различных способах обработки.

Исследование в полевых условиях проводилось в течение двух лет на экспериментальном участке отдела «Агробиология» Центра экологии (г. Брест). Состав почвы: азот общий – 0,058 %, калий – 82 мг/кг, фосфор – 355,81 мг/кг, свинец – 13,4 мкг/кг, медь – 10,1 мкг/кг, цинк – 86,2 мкг/кг, никель – 3,9 мкг/кг, марганец – 113,3 мкг/кг. На первом этапе исследований (2020 г.) обработку исследуемыми веществами проводили аналогично вегетационному лабораторному опыту (замачивание семян при предпосевной обработке или двукратное опрыскивание при внекорневой обработке). Внесение веществ при внекорневой обработке проводилось на стадии первого тройчатого листа (для увеличения способности конкурировать с сорными растениями на начальных этапах роста) и в стадии ветвления – бутонизации (для сохранения листьев и соцветий, которые обладают наибольшей питательной ценностью). В данных условиях фиксировали значения длины растений клевера лугового. На втором этапе исследований (2021 г.) обработку исследуемыми веществами проводили с использованием внекорневого способа обработки растений. В данных условиях фиксировали значения длины растений и массы сухих стеблей с листьями клевера лугового. Статистическая обработка результатов проводилась с помощью Microsoft Excel. Установление достоверности различий от контроля проводили нахождением t-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждения

В результате лабораторного опыта по подбору оптимальных концентраций тестируемых веществ (таблица 1) выявлено, что относительно контроля на параметр средней длины корней клевера достоверный положительный эффект оказывают ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 6,1 %) и 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 6,8 %). На параметр средней длины побегов клевера достоверный положительный эффект относительно контроля оказали 2,3-дндс в концентрации 10^{-10} М (увеличение на 5,3 %) и 2-нс в концентрации 10^{-10} М (увеличение на 3,7 %). Анализ эффективности относительно ЭБ в одинаковых концентрациях, показал, что чуть более активным оказался только динат-рий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-10} М и 10^{-11} М. На начальном этапе роста клевера воздействие исследованной группы веществ незначительно. Для ЭБ в концентрации 10^{-11} М отмечается понижение ростовых параметров, в связи с чем в дальнейшем исследовали концентрации 10^{-10} М и 10^{-9} М. В связи с проявленной

активностью двух концентраций динатрий 2,3-дисульфата ЭБ относительно контроля решено продолжить исследование воздействия этого конъюгата и эпибрасинолида в одинаковых концентрациях на почвенной среде.

Таблица 1. – Влияние ЭБ и его конъюгатов на среднюю длину корней и побегов клевера в лабораторных условиях на беспочвенной среде

№	Вариант обработки	Средняя длина корней		Средняя длина побегов	
		см	% относительно контроля	см	% относительно контроля
1	<i>K</i>	2,54 ± 0,07		3,56 ± 0,06	
2	ЭБ 10 ⁻¹¹ М	2,38 ± 0,06*	-6,5	3,47 ± 0,05	-2,6
3	ЭБ 10 ⁻¹⁰ М	2,61 ± 0,06	2,8	3,59 ± 0,05	0,8
4	ЭБ 10 ⁻⁹ М	2,70 ± 0,06*	6,1	3,61 ± 0,05	1,4
5	2-нс 10 ⁻¹¹ М	2,46 ± 0,06	-3,4	3,68 ± 0,06	3,2
6	2-нс 10 ⁻¹⁰ М	2,38 ± 0,05*	-6,4	3,70 ± 0,05*	3,7
7	2-нс 10 ⁻⁹ М	2,68 ± 0,07	5,3	3,46 ± 0,07	-2,8
8	2,3-дндс 10 ⁻¹¹ М	2,60 ± 0,04	2,1	3,63 ± 0,05	1,8
9	2,3-дндс 10 ⁻¹⁰ М	2,49 ± 0,06	-2,2	3,75 ± 0,07**	5,3
10	2,3-дндс 10 ⁻⁹ М	2,72 ± 0,07*	6,8	3,41 ± 0,06*	-4,4
11	3-нс 10 ⁻¹¹ М	2,23 ± 0,08***	-12,1	3,37 ± 0,06**	-5,4
12	3-нс 10 ⁻¹⁰ М	2,67 ± 0,07	5,2	3,42 ± 0,06	-3,9
13	3-нс 10 ⁻⁹ М	2,45 ± 0,06	-3,6	3,12 ± 0,06****	-12,3
14	22-нс 10 ⁻¹¹ М	2,40 ± 0,06	-5,4	3,64 ± 0,05	2,1
15	22-нс 10 ⁻¹⁰ М	2,28 ± 0,05***	-10,4	3,57 ± 0,06	0,1
16	22-нс 10 ⁻⁹ М	2,48 ± 0,06	-2,7	3,41 ± 0,06*	-4,2
17	23-нс 10 ⁻¹¹ М	2,46 ± 0,06	-3,3	3,53 ± 0,06	-1,0
18	23-нс 10 ⁻¹⁰ М	2,37 ± 0,05*	-6,6	3,56 ± 0,06	-1,0
19	23-нс 10 ⁻⁹ М	2,22 ± 0,05***	-12,8	3,49 ± 0,05	-2,0

Примечание – ЭБ – 24-эпибрасинолид; 2-, 3-, 22-, 23-нс – натрий 2-, 3-, 22-, 23-моносulfат 24-эпибрасинолида; 2,3-дндс – динатрий 2,3-дисульфат 24-эпибрасинолида; * – достоверно при $P \leq 0,1$; ** – достоверно при $P \leq 0,05$; *** – достоверно при $P \leq 0,01$; **** – достоверно при $P \leq 0,001$.

Вегетационный лабораторный эксперимент.

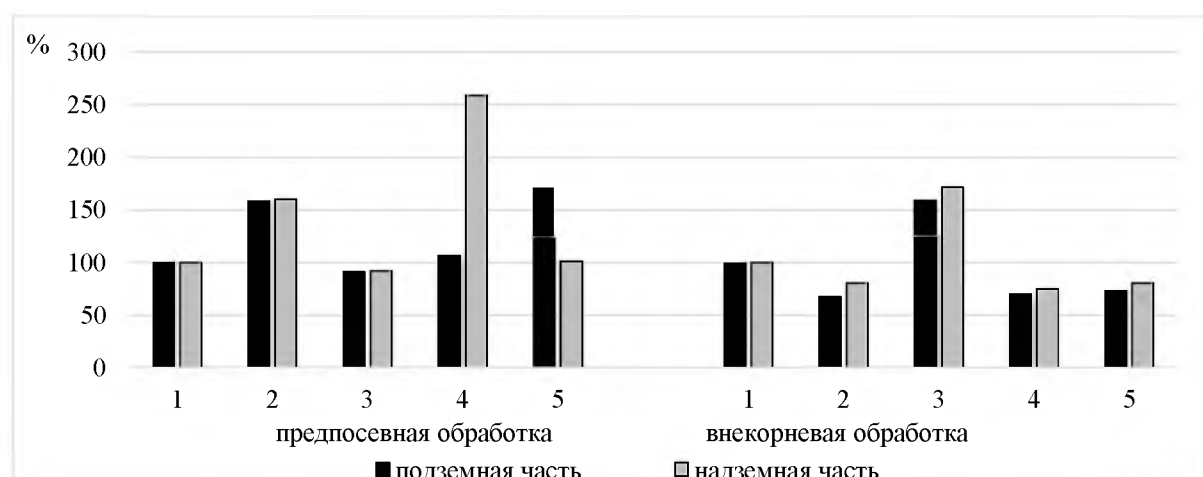
Для дальнейших исследований использовались ЭБ и 2,3-дндс (эффективные концентрации – 10⁻¹⁰ М и 10⁻⁹ М) для следующего этапа исследования – изучения их влияния на морфометрические параметры и биомассу клевера в лабораторном вегетационном эксперименте в почвенной культуре. При предпосевной обработке зафиксировано понижение средней длины корней и побегов растений относительно контроля для обоих отобранных веществ и концентраций (таблица 2). Относительно эпибрасинолида при данном способе обработки достоверного отличия 2,3-дндс от ЭБ не выявлено. При внекорневой обработке растений длина корней клевера незначительно снижалась относительно контроля для всех исследуемых веществ и концентраций за исключением ЭБ в концентрации 10⁻¹⁰ М (повышение на 5,5 %). Для длины побегов клевера зафиксировано достоверное увеличение для всех веществ, однако максимальное значение отмечено для ЭБ в концентрации 10⁻¹⁰ М и 10⁻⁹ М на 8,5 % и 8,2 % относительно контроля. 2,3-дндс показал достоверное повышение длины побегов, однако относительно ЭБ ни для одной из исследуемых концентраций не выявлено достоверных различий.

Таблица 2. – Влияние ЭБ и его конъюгата на среднюю длину корней и побегов клевера в лабораторных условиях на почвенной среде

Вариант обработки	Средняя длина корней		Средняя длина побегов	
	см	% относительно контроля	см	% относительно контроля
Предпосевная обработка				
<i>K</i>	4,03 ± 0,14		7,61 ± 0,13	
ЭБ 10 ⁻¹⁰ М	3,78 ± 0,15	-6,2	7,38 ± 0,15	-3,0
ЭБ 10 ⁻⁹ М	3,92 ± 0,15	-2,6	6,99 ± 0,18***	-8,1
2,3-дндс 10 ⁻¹⁰ М	3,36 ± 0,23**	-16,6	6,83 ± 0,21***	-10,2
2,3-дндс 10 ⁻⁹ М	3,89 ± 0,13	-3,5	7,57 ± 0,14*	-0,6
Внекорневая обработка				
<i>K</i>	4,14 ± 0,11		7,19 ± 0,13	
ЭБ 10 ⁻¹⁰ М	4,37 ± 0,15	5,5	7,80 ± 0,13***	8,5
ЭБ 10 ⁻⁹ М	3,97 ± 0,14	-4,0	7,78 ± 0,21**	8,2
2,3-дндс 10 ⁻¹⁰ М	3,99 ± 0,12	-3,7	7,66 ± 0,13**	6,5
2,3-дндс 10 ⁻⁹ М	3,89 ± 0,13	-5,9	7,61 ± 0,18*	5,8

Примечание – *K* – контроль; ЭБ – 24-этибрассинолид; 2-, 3-дндс – динатрий 2,3-дисульфат 24-этибрассинолида; * – достоверно при $P \leq 0,1$; ** – достоверно при $P \leq 0,05$; *** – достоверно при $P \leq 0,01$; **** – достоверно при $P \leq 0,001$.

При изучении изменения биомассы (сырой и воздушно-сухой) клевера при воздействии исследуемой группы веществ в ряде вариантов обнаружено значительное увеличение содержания сухой массы относительно контроля (рисунок 1). При предпосевной обработке максимальное значение относительно контроля достигается при воздействии ЭБ в концентрации 10⁻¹⁰ М (увеличение массы корней на 58,5 % и побегов на 60,0 %), 2,3-дндс в концентрации 10⁻¹⁰ М (увеличение массы корней на 7,3 % и побегов на 158,7 %) и 2,3-дндс в концентрации 10⁻⁹ М (увеличение массы корней на 70,7 % и побегов на 1,3 %). При внекорневой обработке увеличение содержания сухой массы клевера (корней и побегов) относительно контроля наблюдается при воздействии только ЭБ в концентрации 10⁻⁹ М (увеличение корней на 59,1 % и побегов на 71,7 %).



Примечание – 1 – контроль; 2 – 24-этибрассинолид в концентрации 10⁻¹⁰М; 3 – 24-этибрассинолид в концентрации 10⁻⁹М; 4 – динатрий 2,3-дисульфат 24-этибрассинолида в концентрации 10⁻¹⁰М; 5 – динатрий 2,3-дисульфат 24-этибрассинолида в концентрации 10⁻⁹М.

Рисунок. – Влияние ЭБ и его эфиров с серной кислотой на воздушно-сухую биомассу клевера, выращенного в результате вегетационного опыта в лабораторных условиях

По результатам лабораторных исследований можно сделать вывод о повышении активности данной группы веществ при увеличении факторов воздействия окружающей среды, а именно почвенных показателей. Отмечается ингибирование начального роста клевера лугового, в частности длины корней растений, при предпосевной обработке и увеличении длины побегов клевера при внекорневой обработке ЭБ и его сульфопроизводным 2,3-дндс. Сравнивая действие способов обработки на ростовые параметры, можно говорить о преимуществе внекорневого типа обработки для клевера лугового в лабораторных условиях. Наибольшей активностью для ЭБ и 2,3-дндс отличается концентрация 10^{-10} М.

Полевой эксперимент. В полевом эксперименте первого года исследования были заложены опыты с изучением двух способов обработки исследуемыми соединениями. Фиксировали длину побегов клевера лугового в двух укосах в зависимости от способа внесения веществ (таблица 3).

Таблица 3. – Влияние ЭБ и его конъюгата на среднюю длину побегов клевера в полевых условиях (2020 г.)

Вариант обработки	Средняя длина побегов			
	см	% относительно контроля	см	% относительно контроля
	первый укос		второй укос	
Предпосевная обработка				
<i>K</i>	17,30 ± 0,40		3,40 ± 0,21	
ЭБ 10^{-10} М	15,57 ± 0,81*	-10,0	3,87 ± 0,22	13,75
ЭБ 10^{-9} М	18,68 ± 0,50**	8,0	4,14 ± 0,23**	21,54
2,3-дндс 10^{-10} М	22,22 ± 0,37****	28,5	4,14 ± 0,20**	21,58
2,3-дндс 10^{-9} М	24,52 ± 0,33****	41,8	4,21 ± 0,23**	23,66
Внекорневая обработка				
<i>K</i>	17,72 ± 0,35		3,83 ± 0,25	
ЭБ 10^{-10} М	19,97 ± 0,26****	12,7	4,56 ± 0,25**	19,10
ЭБ 10^{-9} М	19,81 ± 0,29****	11,8	4,81 ± 0,25***	25,61
2,3-дндс 10^{-10} М	20,10 ± 0,34****	13,4	5,16 ± 0,23****	34,76
2,3-дндс 10^{-9} М	20,54 ± 0,29****	15,9	5,20 ± 0,22****	35,59

Примечание – *K* – контроль; ЭБ – 24-этибрассинолид; 2-, 3-дндс – динатрий 2,3-дисульфат 24-этибрассинолида; * – достоверно при $P \leq 0,1$; ** – достоверно при $P \leq 0,05$; *** – достоверно при $P \leq 0,01$; **** – достоверно при $P \leq 0,001$.

В первом укосе клевера наблюдается значительный эффект от воздействия на ростовые показатели растений, обработанных ЭБ и его конъюгатами. Так, при предпосевной обработке семян активность относительно контроля проявили ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 8,0 %), 2,3-дндс в концентрациях 10^{-10} М (28,5 %) и 10^{-9} М (41,8 %). При внекорневой обработке зафиксировано повышение роста растений (в диапазоне от 11,8 до 15,9 %) для всех изученных соединений. Максимальное увеличение длины зафиксировано для 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 15,9 %). Сравнение результатов действия ЭБ и его конъюгата в одинаковых концентрациях показало эффективность предпосевной обработки. Так, в концентрации 10^{-10} М 2,3-дндс оказался эффективнее ЭБ на 42,7 %, а в концентрации 10^{-9} М – на 31,3 %. При внекорневой обработке отмечено незначительное увеличение (3,7 %) относительно ЭБ для 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М.

Во втором укосе клевера наблюдается значительное повышение эффективности всех исследуемых веществ для двух способов обработки, однако эффект от предпосевной обработки значительно снижается. Так, при предпосевной обработке длина надземной части клевера увеличивалась по сравнению с контролем в диапазоне от 13,7 % при использовании ЭБ в концентрации 10^{-10} М до 23,7 % при использовании 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М. При внекорневой обработке диапазон увеличения длины надземной части клевера составил от 19,1 % при использовании ЭБ в концентрации 10^{-10} М до 35,6 % при использовании 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М. При предпосевной обработке в концентрации 10^{-10} М применение 2,3-дндс эффективнее ЭБ на 6,9 %, а в концентрации 10^{-9} М – на 1,7 %. При внекорневой обработке в концентрации 10^{-10} М применение 2,3-дндс эффективнее ЭБ на 13,1 %, а в концентрации 10^{-9} М – на 8,0 %. Изменение длины клевера лугового относительно контроля в зависимости от укоса говорит о положительном влиянии данной группы веществ на длину клевера во втором укосе, за исключением 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М. Наибольшей эффективностью и универсальностью отличается внекорневая обработка.

По результатам полевого эксперимента 2020 г. на второй год выращивания клевера лугового для изучения влияния ЭБ и его конъюгатов на морфометрические параметры использовалась только внекорневая обработка (таблица 4).

Таблица 4. – Влияние ЭБ и его конъюгата на среднюю длину побегов клевера в полевых условиях (2021 г.)

Вариант обработки	Средняя длина надземной части			
	см	% относительно контроля	см	% относительно контроля
	первый укос		второй укос	
	Внекорневая обработка			
<i>K</i>	19,28 ± 0,64		17,64 ± 0,58	
ЭБ 10^{-10} М	22,24 ± 1,01**	15,3	20,45 ± 0,50****	15,9
ЭБ 10^{-9} М	22,32 ± 0,73***	15,8	22,21 ± 0,60****	25,9
2,3-дндс 10^{-10} М	20,96 ± 0,86	8,7	19,83 ± 0,49***	12,4
2,3-дндс 10^{-9} М	22,48 ± 0,95***	16,6	21,55 ± 0,56****	22,2

Примечание – *K* – контроль; ЭБ – 24-этибрассинолид; 2-, 3-дндс – динатрий 2,3-дисульфат 24-этибрассинолида; * – достоверно при $P \leq 0,1$; ** – достоверно при $P \leq 0,05$; *** – достоверно при $P \leq 0,01$; **** – достоверно при $P \leq 0,001$.

Результаты выращивания клевера во втором году по сравнению с предыдущим годом показали, что в первом укосе большую эффективность проявили как ЭБ, так и его конъюгат 2,3-дндс в двух исследуемых концентрациях. Так, в концентрации 10^{-9} М для ЭБ увеличение длины относительно контроля составило 15,8 %, а для 2,3-дндс в той же концентрации зафиксировано увеличение на 16,6 %.

В концентрации 10^{-10} М ЭБ превзошел активность конъюгата (15,3 % для ЭБ и 8,7 % для 2,3-дндс) относительно контроля. Незначительную активность относительно ЭБ проявил 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М.

Во втором укосе клевера наблюдается значительное повышение воздействия как ЭБ, так и 2,3-дндс относительно контроля. Наилучший результат был получен для ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 25,9 %) и для 2,3-дндс в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 22,2 %).

При анализе результатов по выходу биомассы клевера при воздействии исследуемых веществ не обнаружено достоверного увеличения сухой массы относительно контроля (таблица 5). Увеличение длины клевера без увеличения биомассы растений может

быць звязана з воздействием ЭБ и его конъюгатов на стимуляцию растяжения и деления клеток в меристемах подобно ауксинам и гиббереллинам [14].

Таблица 5. – Влияние ЭБ и его конъюгата на сухую биомассу клевера, выращенного в результате полевого опыта 2021 г.

Вариант обработки	Надземная часть, г		Содержание воды, %	Содержание сухой массы, %
	Масса растений			
	сырая	сухая		
<i>K</i>	9,07	2,11	76,68	23,32
ЭБ 10^{-10} М	7,28	1,70	76,63	23,37
ЭБ 10^{-9} М	7,40	1,72	76,72	23,28
2,3-дндс 10^{-10} М	6,55	1,50	77,11	22,89
2,3-дндс 10^{-9} М	7,13	1,67	76,56	23,44

Примечание – *K* – контроль; ЭБ – 24-эпибрассинолид; 2-, 3-дндс – динатрий 2,3-дисульфат 24-эпибрассинолида; * – достоверно при $P \leq 0,1$; ** – достоверно при $P \leq 0,05$; *** – достоверно при $P \leq 0,01$; **** – достоверно при $P \leq 0,001$.

Таким образом, по параметру длины надземной части клевера лугового первого года выращивания в полевых условиях (2020 г.) наибольшую активность проявил динатрий 2,3-дисульфат 24-эпибрассинолида в концентрации 10^{-9} М независимо от способа внесения. На втором этапе исследования (2021 г.) динатрий 2,3-дисульфат 24-эпибрассинолида в концентрации 10^{-9} М проявил активность наравне с эпибрассинолидом. По результатам исследований двух вегетационных сезонов отмечается превосходство внекорневого способа обработки клевера лугового. Относительно контроля показатели длины побегов второго укоса в основном выше по сравнению с первым укосом. Это может быть обусловлено стресс протекторным действием тестируемых БС (лучшее отрастание побегов после укоса).

Наблюдаемая нами полифункциональность конъюгатов эпибрассинолида с серной кислотой может быть обусловлена вызовом специфического физиологического ответа в зависимости от условий, влияющих на растение при его росте и развитии, а также в зависимости от способа их внесения. Более детальные закономерности влияния эпибрассинолида и его сульфопроизводных будут проанализированы при последующем сравнении их с биохимическими параметрами клевера лугового.

Заключение

Поэтапное исследование биологической активности 24-эпибрассинолида и его натриевых солей эфиров с серной кислотой по влиянию на параметры длины и биомассы клевера лугового в зависимости от условий выращивания и способов обработки показало, что в лабораторных условиях действие 24-эпибрассинолида и его конъюгатов неэффективно. Заметное влияние наблюдается только в вегетационном лабораторном опыте. Причем на почвенной среде при предпосевной обработке зафиксировано снижение длины корней и побегов клевера, а внекорневая обработка оказывала положительное воздействие на длину побегов. По двум ростовым параметрам клевера наибольшую активность проявил 24-эпибрассинолид в концентрации 10^{-10} М.

Анализ выхода биомассы клевера показал, что максимальное увеличение массы надземной части зафиксировано при обработке 24-эпибрассинолида и динатрий 2,3-дисульфата 24-эпибрассинолида в концентрации 10^{-10} М при предпосевной обработке, а при внекорневой обработке лишь для 24-эпибрассинолида в концентрации 10^{-9} М.

Значительная биологическая активность исследуемых веществ наблюдалась в полевых опытах, где присутствует многофакторность условий (температура, влажность и др.).

В первый год произрастания (вегетационный сезон 2020 г.) как в первом, так и во втором укосе клевера, независимо от типа обработки, максимальное увеличение длины побегов зафиксировано при воздействии 2,3-дисульфата династрия 24-эпибрассинолида в концентрации 10^{-9} М.

На второй год произрастания клевера (сезон 2021 г.) при внекорневой обработке растений как в первом укосе клевера, так и во втором максимальное достоверное увеличение длины побегов зафиксировано для эпибрассинолида и 2,3-дисульфата династрия 24-эпибрассинолида в концентрации 10^{-9} М.

В зависимости от укоса изменение длины клевера лугового относительно контроля говорит о проявлении большей активности данной группы веществ в основном во втором укосе клевера. Сравнивая типы обработки, для клевера лугового выявлено, что наибольшей эффективностью и универсальностью отличается внекорневая обработка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khripach, V. Brassinosteroids: a new role of steroids as bio-signaling molecules / V. Khripach, V. Zhabinskii, R. Karnachuk // *Chemical probes in biology : Science at the Interface of Chemistry, Biology and Medicine* ; ed. M. P. Schneider. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2003. – P. 153–167.
2. Hayat, S. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
3. Ефимова М. В. Регуляция эпибрассинолидом морфогенеза и содержания фотосинтетических пигментов в проростках *Arabidopsis thaliana* / М. В. Ефимова, М. А. Елисеева // *Тр. Том. гос. ун-та. Сер. биол.* – 2010. – № 275. – С. 267–271.
4. Влияние лактон- и кетонсодержащих брассиностероидов на фотосинтетическую активность листьев ячменя при старении / И. С. Ковтун [и др.] // *Физиология растений.* – 2021. – Т. 68, № 3. – С. 268–278.
5. Защитное действие салицилатов брассиностероидов на растения ярового ячменя, подвергнутые биотическому стрессу / Н. Е. Манжелесова [и др.] // *Докл. НАН Беларуси.* – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 304–311.
6. Bajguz, A. Metabolism of brassinosteroids in plants / A. Bajguz // *Plant Physiol. Biochem.* – 2007. – Vol. 45, nr 2. – P. 95–107.
7. Inactivation of brassinosteroid biological activity by a salicylate-inducible steroid sulfotransferase from *Brassica napus* / M. Rouleau [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 1999. – Vol. 274, nr 30. – P. 20925–20930.
8. Dawson, P. A. The biological roles of steroid sulfonation / P. A. Dawsow // *From Physiology to Clinical Medicine.* – 2012. – Vol. 36, nr 5. – P. 45–64.
9. Synthesis of sulfated brassinosteroids / H. Zhylitskaya [et al.] // *Steroids.* – 2017. – Vol. 117. – P. 2–10.
10. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038-84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартиформ, 2011. – 29 с.
11. Методика определения силы роста семян кормовых культур / В. И. Карпин [и др.]. – М. : Изд-во РГАУ – МСХА, 2012. – 16 с.
12. Журбицкий, З. И. Теория и практика вегетационного метода / З. И. Журбицкий. – М. : Наука, 1968. – 260 с.
13. Дуктова, Н. А. Учебная практика по физиологии и биохимии растений : программа и метод. указания / Н. А. Дуктова, А. И. Мыхлык, В. П. Моисеев. – Горки : БГСХА, 2018. – 56 с.
14. Brassinosteroid production and signaling differentially control cell division and expansion in the leaf / M. K. Zhiponova [et al.] // *New Phytol.* – 2013. – Vol. 197. – P. 490–502.

REFERENCES

1. Khripach, V. Brassinosteroids: a new role of steroids as bio-signaling molecules / V. Khripach, V. Zhabinskii, R. Karnachuk // *Chemical probes in biology : Science at the Interface of Chemistry, Biology and Medicine* ; ed. M. P. Schneider. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2003. – P. 153–167.
2. Hayat, S. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
3. Yefimova, M. V. Rieglaciya epibrassinolidom morfogeneza i sodierzhanija fotosintetichieskikh pigmentov v prorostkakh *Arabidopsis thaliana* (L.) / M. V. Yefimova, M. A. Yelisejeva // *Tr. Tom. gos. un-ta. Sier. biol.* – 2010. – № 275. – S. 267–271.
4. Vlijanije lakton- i kietonsodierzhashchikh brassinosteroidov na fotosintetichieskuju aktivnost' list'jev jachmienia pri starienii / I. S. Kovtun [i dr.] // *Fiziologija rastienij.* – 2021. – T. 68, № 3. – S. 268–278.
5. Zashchitnoje diejstvije salicilatov brassinosteroidov na rastienija jarovogo jachmienia, podviergnutykh biotichieskomu stressu / N. Ye. Manzheliesova [i dr.] // *Dokl. NAN Bielarusi.* – 2019. – T. 63, № 3. – P. 304–311.
6. Bajguz, A. Metabolism of brassinosteroids in plants / A. Bajguz // *Plant Physiol. Biochem.* – 2007. – Vol. 45, nr 2. – P. 95–107.
7. Inactivation of brassinosteroid biological activity by a salicylate-inducible steroid sulfotransferase from *Brassica napus* / M. Rouleau [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 1999. – Vol. 274, nr 30. – P. 20925–20930.
8. Dawson, P. A. The biological roles of steroid sulfonation / P. A. Dawsow // *From Physiology to Clinical Medicine.* – 2012. – Vol. 36, nr 5. – P. 45–64.
9. Synthesis of sulfated brassinosteroids / H. Zhylitskaya [et al.] // *Steroids.* – 2017. – Vol. 117. – P. 2–10.
10. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielienija vskhozhesti : GOST 12038-84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.
11. Mietodika opriedielienija sily rosta siemian kormovykh kul'tur / V. I. Karpin [i dr.]. – M. : Izd-vo RGAU – MSKhA, 2012. – 16 s.
12. Zhurbickij, Z. I. Tieorija i praktika viegietacionnogo mietoda / Z. I. Zhurbickij. – M. : Nauka, 1968. – 260 s.
13. Duktova, N. A. Uchiebnaja praktika po fiziologii i biokhimii rastienij : programma i mietod. ukazaniya / N. A. Duktova, A. I. Mykhlyk, V. P. Moisiejev. – Gorki : BGSKhA, 2018. – 56 s.
14. Brassinosteroid production and signaling differentially control cell division and expansion in the leaf / M. K. Zhiponova [et al.] // *New Phytol.* – 2013. – Vol. 197. – P. 490–502.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 09.03.2022

УДК 556.16.06

Александр Александрович Волчек¹, Светлана Васильевна Сидак²

¹д-р геогр. наук, проф., декан факультета инженерных систем и экологии

Брестского государственного технического университета

²ассистент каф. информатики и прикладной математики

Брестского государственного технического университета

Aleksander Volchak¹, Svetlana Sidak²

¹Doctor of Geographical Sciences, Professor,

Dean of the Faculty of Engineering Systems and Ecology

of the Brest State Technical University

²Assistant of the Department of Informatics and Applied Mathematics

of the Brest State Technical University

e-mail: ¹volchak@tut.by, ²harchik-sveta@mail.ru

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПРОГНОЗ СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ*

Представлен новый подход к вероятностному прогнозированию стока рек Беларуси в нестационарных условиях, основанный на использовании вероятностной модели стока в виде суммы двух законов распределения с весовыми коэффициентами, учитывающими фрактальные характеристики гидрологических рядов. В результате применения данной модели к максимальным и минимальным расходам стока рек Беларуси получены прогнозные оценки данных видов стока для наиболее крупных рек Беларуси. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с результатами моделирования по классической вероятностной модели с назначением весовых коэффициентов пропорционально длинам выборок каждого стационарного периода.

Ключевые слова: моделирование, прогнозные оценки, нестационарность, фрактальный анализ, речной сток.

Probabilistic Forecast of River Runoff in Belarus in Modern Conditions

The article presents a new approach to probabilistic runoff forecasting in Belarus under non-stationary conditions, based on a collection of probabilistic runoff models in the form of sums of two distribution patterns with weight coefficients that take into account the fractal characteristics of hydrological series. As a result of applying this model to the maximum and minimum runoff rates of the rivers of Belarus, forecast estimates of these types of runoff for the largest rivers of Belarus were obtained. A comparative analysis of the obtained results with the results of modeling according to the classical probabilistic model with the assignment of weight coefficients in proportion to the lengths of the samples of each stationary period is carried out.

Key words: modeling, predictive estimates, non-stationarity, fractal analysis, river runoff

Введение

Необходимым условием эффективного планирования и управления в области водных ресурсов, рационального их использования, а также минимизации возможных ущербов, связанных с опасными гидрологическими явлениями, является возможность работы с достоверными и научно-обоснованными оценками как современного состояния водных ресурсов, так и прогнозируемых на будущее. Согласно проекту Водной стратегии Республики Беларусь до 2030 г. на сегодняшний день имеется недостаточный объем научных исследований для проведения достоверной оценки дальнейшего влияния изменения климата на водные ресурсы Беларуси. Влияние изменения климата и антропогенных воздействий на гидрологические процессы выражается в нестационарности гидрологичес-

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X20M064).

ских рядов данных. Следствием этого является тот факт, что получение прогнозных оценок гидрологических характеристик проводится в условиях большой неопределенности. Особенно затруднительным является моделирование максимальных и минимальных летне-осенних расходов речного стока, представляющих наибольшие риски для экономики страны и для безопасности населения.

За последние два десятилетия парадигма гидрологического прогнозирования изменилась с детерминированной на вероятностную [1]. В ряде исследований по получению прогнозных оценок речного стока в нестационарных условиях исходят из методологического положения, состоящего в том, что только на основе вероятностных подходов возможно дать учитывающее основные источники неопределенности прогнозное распределение стока с большой заблаговременностью [2].

В связи с этим целью данной работы является получение прогнозных оценок максимального и минимального летне-осеннего стока рек Беларуси в вероятностной форме с учетом нестационарности гидрологической системы.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы данные гидрологических наблюдений за максимальными и минимальными расходами стока рек Беларуси за период инструментальных наблюдений Республиканского гидрометеорологического центра Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Прогнозные оценки получены для пяти гидрологических постов наиболее крупных рек Беларуси: Припять (г. Мозырь), Неман (г. Гродно), Западная Двина (г. Витебск), Березина (г. Бобруйск), Днепр (г. Орша). Период исследования составил 70 лет (1948–2017 гг.). Пропуски в рядах данных восстановлены с помощью компьютерного программного комплекса «Гидролог» [3].

Характер нарушения стационарности рядов инструментальных наблюдений за максимальным и минимальным летне-осенним стоком крупных рек Беларуси позволяет сделать вывод о том, что все ряды максимального и большинство рядов минимального стока можно рассматривать состоящими из двух последовательных стационарных участков [4]. Согласно существующим методическим рекомендациям, в случае неоднородности исходных данных гидрологических наблюдений, когда рассматриваемый ряд состоит из неоднородных элементов гидрологического режима, эмпирические и аналитические кривые распределения устанавливаются отдельно для каждой однородной совокупности [5]. Итоговая схема моделирования предполагает построение расчетной кривой обеспеченности в виде суммы двух законов распределения с заданными весовыми коэффициентами, пропорциональными длинам выборок. В практике гидрологического моделирования такая модель имеет название «смесь распределений». В этом случае для плотности распределения $f(Q)$ и кривой обеспеченности $P(Q)$ справедливы следующие формулы:

$$f(Q) = \alpha_1 f_1(Q) + \alpha_2 f_2(Q), \quad (1)$$

$$P(Q) = 1 - \int_0^Q [\alpha_1 f_1(Q) + \alpha_2 f_2(Q)] dQ, \quad (2)$$

где $\alpha_1 = \frac{n_1}{n_1+n_2}$, $\alpha_2 = \frac{n_2}{n_1+n_2}$ – весовые коэффициенты, n_1 , n_2 – число членов в каждой из двух однородных совокупностей. Согласно [5] весовые коэффициенты можно задать и другими способами, но необходимо выполнение условия:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (3)$$

Реализация вероятностного прогноза с использованием модели (1) требует последовательного решения ряда задач: 1) анализ «характера» нестационарности гидрологического ряда (поиск точек разладки во временных рядах); 2) идентификация наиболее

подходящей вероятностной модели распределения речного стока для условно однородного участка; 3) учет имеющейся нестационарности в прогнозной модели.

Решение первой задачи выполнено авторами статьи в работе [5]. Оценка однородности рядов стока выполнена с использованием пяти тестов: Стьюдента, Фишера, Буишанда, Петтитта, Стандартного нормального теста на однородность. По результатам проверки однородности гидрологических рядов по пяти предложенным тестам исследуемые ряды классифицированы в зависимости от количества тестов, принимающих гипотезу об однородности данных на уровне значимости 5 % по следующим правилам:

1) ряд данных относится к классу А, если нулевая гипотеза принимается всеми тестами либо отвергается одним по пяти тестов на 5 %-ом уровне значимости;

2) ряд данных относится к классу В, если два или три теста отклоняют нулевую гипотезу об однородности данных;

3) ряд данных относится к классу С, если четыре или пять тестов отклоняют нулевую гипотезу об однородности данных на 5 %-ом уровне значимости.

В результате проверки рядов максимального и минимального речного стока на однородность пришли к результату: все исследуемые ряды максимального стока принадлежат к классу С (точки разладки в этих рядах приходятся на период 1970–1988 гг.); ряды минимального летне-осеннего стока для створов рек Березина (г. Бобруйск), Днепр (г. Орша), Припять (г. Мозырь) принадлежат к классу С, остальные – к классу А.

Решение второй задачи при реализации вероятностного прогнозирования выполнено в работах [6; 7]. На основании проведенных исследований в качестве теоретической кривой распределения условно стационарного участка для описания минимального стока рек Беларуси представляется возможным использование распределения Гумбеля, для максимального стока – распределения Вейбулла, дающих наилучшую аппроксимацию исходных данных.

Недостаток модели «смеси распределений» (1) заключается в том, что данная модель больше подходит для оценки уже произошедших изменений гидрологического режима на момент прогноза, но не для получения прогнозных оценок в будущем. Причиной этого служит тот факт, что в данной модели учитываются только предыдущие состояния гидрологической системы, т. е. состояния, в которых она пребывала до момента прогноза. Но данная модель не учитывает состояние, в которое система перейдет в прогнозном периоде.

Второй недостаток состоит в назначении весовых коэффициентов модели. Назначение коэффициентов пропорционально длинам выборок однородных периодов предполагает, что вероятность пребывания гидрологической системы в прогнозном периоде в условиях формирования стока, схожих первому стационарному периоду, составляет α_1 , второму стационарному периоду – α_2 . Однако, учитывая наблюдаемое потепление климата и большую вероятность продолжения наметившейся тенденции в его изменении, вероятность того, что гидрологическая система будет находиться в условиях, схожих со вторым стационарным периодом, должна превосходить вероятность возврата к прошлому (первому) стационарному состоянию системы. В связи с этим весьма актуальной является проблема обоснованного выбора весовых коэффициентов в модели (1), которые бы количественно отражали вероятность развития гидрологической системы и условий формирования стока в прогнозном периоде по каждому условно стационарному периоду до момента прогноза. В данном исследовании оценить эту вероятность предлагается с использованием фрактального анализа гидрологических рядов [8].

Метод фрактального анализа является инструментом, позволяющим вычислять параметры, отражающие неявные, скрытые свойства гидрологических процессов и получившим в последнее время широкое развитие в самых разнообразных областях науки. Суть метода фрактального анализа состоит в том, что состояние системы, в котором она

находится в настоящий момент, формируется на основе предыдущих состояний системы или процесса. В результате временной ряд на определенном промежутке является фрактальным (самоподобным). Отличительным свойством при реализации фрактального анализа (в отличие, например, от марковских цепей) является то, что в процессе анализа принимаются во внимание не только состояния системы, в которых она пребывала непосредственно до начала прогноза, но и состояния, происходившие давно относительно настоящего момента. Основной целью процесса фрактального анализа рядов расходов речного стока является установление наличия и численная оценка таких фундаментальных характеристик гидрологических рядов, как долговременная память, трендоустойчивость (персистентность) и антиперсистентность.

В теории фрактального анализа известны несколько способов исследования временных рядов и оценки их фрактальных размерностей. В гидрологических исследованиях наиболее часто используется метод, основанный на исследованиях английского гидролога Хёрста, который в начале XX в. занимался изучением уровня воды в р. Нил и доказал, что большинство естественных явлений следуют случайности на каждом последовательном шаге (представляют собой комбинацию тренд + шум). Этот метод анализа, основанный на вычислении показателя Хёрста (H), в научной литературе носит название R/S анализа [9]. Специфика метода ориентирована на анализ нелинейных колебаний, колебаний с непостоянными амплитудой и частотой. В отличие от спектрального и корреляционного анализов, метод R/S анализа не требует, чтобы рассматриваемая выборка и ее подвыборки изменялись по гармоническому закону. Величина H характеризует отношение устойчивости текущей тенденции ряда (детерминированная составляющая) к уровню шума (случайная составляющая). Основным достоинством критерия Хёрста является его устойчивость к априорному распределению временного ряда и возможность достаточно просто выявить периодические и даже непериодические циклы.

Результирующее значение H колеблется от 0 до 1 и является главным показателем трендоустойчивости ряда, а также определяет цвет шума. При определенных значениях H можно просто и надежно прогнозировать течение изучаемого процесса на основе предыдущих состояний процесса. Если показатель H равен 0,5, то сигнал представляет собой случайный процесс (белый шум). Для процессов с более высоким значением H ($H > 0,5$) присуща персистентность. Это означает, что предыдущие значения ряда непосредственно повлияют на будущие значения, таким образом, наступление экстремального события будет предпосылкой более высокой вероятности того, что за ним последуют другое экстремальное событие. Чем ближе значение показателя H к 1, тем больше эта вероятность. Показатель $H > 0,6$ определяет область черного шума и указывает на наличие эффекта «долговременной памяти». Более низкий показатель H ($H < 0,5$) имеет отрицательную долгосрочную зависимость и соответствует области розового шума. Таким процессам характерна антиперсистентность, т. е. значения на текущем этапе противоположно влияют на будущее поведение ряда. В этом случае появление экстремального события будет фактом того, что за ним последует другое экстремальное, но противоположное событие (например, за наводнением последует засуха). Такой ряд практически нельзя предсказать. Так как показатель H выступает своего рода вероятностью пребывания гидрологической системы в последнем стационарном состоянии, модель прогнозирования стока (1) будет иметь следующий вид:

$$f(Q) = (1 - H)f_1(Q) + Hf_2(Q), \quad (4)$$

где H – показатель Хёрста нестационарного ряда расходов речного стока.

Для оценки области применимости прогнозной модели (4) необходимо определить максимальный временной интервал прогнозирования t_{max} . При вероятностном

прогнозировании речного стока предлагается максимальному временному интервалу прогнозирования t_{max} поставить в соответствие максимальную глубину долговременной памяти l_{max} временного ряда. Глубина долговременной памяти l_{max} содержательно означает количество значений временного ряда, после которого теряется память о начальной точке.

В работе [10] рассмотрены алгоритмы и результаты расчета показателя N для рядов стока рек Беларуси. Полученные в исследовании значения показателя N для исследуемых рядов максимального и минимального стока рек Беларуси больше $\theta, 6$, следовательно, временные ряды являются персистентными. Ориентировочная длина «памяти» для них составляет 30 точек.

Результаты и их обсуждение

В таблицах 1 и 2 представлены результаты вероятностного прогноза максимального и минимального летне-осеннего стока рек Беларуси на основании данных о расходах речного стока за период с 1948 по 2017 г. для трех вариантов расчета: I – прогноз, учитывающий только последний стационарный период; II – прогноз с назначением весовых коэффициентов пропорционально объемам выборок стационарных периодов; III – прогноз, полученный по модели (4).

Таблица 1. – Ординаты аналитической кривой распределения Вейбулла для максимальных расходов воды весеннего половодья

P, %	Q, м ³ /с														
	Западная Двина (Витебск)			Днепр (Орша)			Припять (Мозырь)			Березина (Бобруйск)			Неман (Гродно)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,1	3314	3757	3508	1536	2250	1848	5847	7029	6364	1231	3085	2269	1535	3857	2835
1	2648	2986	2796	1186	1636	1383	3954	4845	4344	835	1969	1470	1159	2485	1901
3	2298	2588	2425	1009	1345	1156	3086	3805	3401	656	1462	1107	972	1857	1467
5	2130	2397	2247	927	1212	1052	2641	3314	2935	567	1210	927	886	1560	1263
10	1883	2117	1985	804	1017	897	2083	2644	2329	455	902	705	759	1188	999
20	1607	1812	1697	676	830	744	1567	1987	1751	354	629	508	629	862	760
30	1424	1611	1506	596	719	650	1288	1611	1429	302	494	410	546	702	633
40	1281	1456	1358	533	639	579	1108	1348	1213	267	402	343	486	592	545
50	1158	1323	1230	482	577	524	967	1140	1043	241	336	294	437	520	484
60	1039	1198	1109	434	525	474	868	969	912	224	294	263	391	468	434
70	926	1075	991	389	479	429	797	836	814	212	265	241	350	432	396
80	797	946	862	345	439	386	634	664	647	202	245	226	311	405	363
90	644	790	708	295	401	341	701	602	658	198	236	219	267	384	333
95	541	685	604	261	379	313	689	546	627	197	235	218	240	372	314
97	472	623	538	242	368	297	687	520	614	196	234	217	228	366	305
99	363	522	433	217	355	278	684	499	603	194	232	215	209	358	293
99,9	225	398	301	189	343	256	683	486	597	193	231	214	195	352	283

Таблица 2. – Ординаты аналитической кривой распределения Гумбеля для минимальных летне-осенних расходов воды речного стока

P, %	Q, м ³ /с								
	Днепр (Орша)			Припять (Мозырь)			Березина (Бобруйск)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,1	89	88	88	514	535	578	108	108	108
1	76	71	73	402	407	445	95	93	94
3	70	63	65	344	343	378	88	85	86
5	66	59	61	317	313	346	84	81	82
10	61	53	56	277	269	300	78	75	76
20	54	46	50	234	223	251	72	68	70
30	50	42	45	206	193	219	67	63	65
40	46	39	42	184	171	195	63	59	61
50	43	37	39	166	153	175	59	56	57
60	40	34	36	149	136	156	56	53	54
70	36	32	33	131	120	137	52	49	50
80	32	29	30	114	104	119	48	45	46
90	26	26	26	94	86	98	42	40	41
95	22	24	23	80	74	84	37	36	36
97	19	22	21	72	68	77	34	34	34
99	11	18	16	60	59	65	30	30	30
99,9	6	16	12	45	50	52	20	22	21

Примечание – в таблице приведены прогнозные оценки только по тем створам, ряды минимального летне-осеннего стока для которых являются неоднородными.

Из таблиц 1 и 2 видно, что результаты прогноза расходов речного стока с использование модели с назначением весовых коэффициентов пропорционально объемам выборок в большинстве случаев завышены по сравнению с результатами, полученными по модели (4). Особенно это выражено для максимального стока, где значения прогнозных оценок для II и III вариантов расчета отличаются для некоторых исследуемых створов на 30 %. Таким образом, использование подхода с назначением весовых коэффициентов в модели вероятностного прогноза с учетом фрактальных характеристик рядов позволяет получить более обоснованные и выгодные с экономической точки зрения результаты.

Заклучение

Предложен новый подход в получении прогнозных оценок стока рек Беларуси в нестационарных условиях, основанный на построении прогнозной модели в виде «смеси распределений» с назначением весовых коэффициентов, учитывающих фрактальную размерность гидрологических характеристик. Предложенный метод вероятностного моделирования стока с назначением весовых коэффициентов, учитывающих смену стационарных состояний гидрологического процесса, позволяет получить научно обоснованные и эффективные прогнозные оценки речного стока, что будет способствовать более рациональному использованию водных ресурсов Беларуси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучмент, Л. С. Развитие методов гидрологических прогнозов и смена их парадигмы / Л. С. Кучмент // Избр. тр. Ин-та водных проблем РАН: 1967–2017 : в 2-х т. – М. : КУРС, 2017. – Т. 2. – С. 5–24.
2. Болгов, М. В. Стохастическая гидрология: развитие основных идей в России / М. В. Болгов // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Науки о Земле. – 2021. – № 66 (1). – С. 19–40.
3. Волчек, А. А. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та и 50-летию фак. инженер. систем и экологии, Брест, 7–8 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 101–113.
4. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения = Разліковыя гідралагічныя характарыстыкі. Парадак вызначэння : ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Минск : Стройтехнорм, 2010. – 55 с.
5. Volchak, A. A. Statistical assessment of the runoff time series homogeneity of the rivers in Belarus / A. A. Volchak, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk // Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3 (126). – С. 92–95.
6. Волчек, А. А. К вопросу о распределении различных видов стока / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 27–29 сент. 2021 г. : в 2 ч. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. А. Лысенко, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест : БрГУ, 2021. – Ч. 2. – С. 27–31.
7. Волчек, А. А. Учет распределения максимальных значений речного стока при реставрации историко-культурных ценностей / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Реставрация историко-культурных объектов как сохранение культурного наследия Республики Беларусь : сб. ст. науч.-техн. семинара, Брест, 30 сент. 2020 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол. Э. А. Тур [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2020. – С. 35–39.
8. Волчек, А. А. К вопросу исследования гидрометеорологических рядов методами фрактального анализа / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : РГГМУ, 2020. – С. 321–323.
9. Hurst, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs / H. E. Hurst // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. – 1951. – № 116. – P. 770–808.
10. Волчек, А. А. Фрактальный анализ рядов речного стока / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности : сб. ст. по материалам XVII Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 26 марта 2021 г. / Воронеж. гос. техн. ун-т ; редкол.: П. С. Куприенко (отв. ред.) [и др.]. – Воронеж : ВГТУ, 2021. – С. 362–367.

REFERENCES

1. Kuchmient, L. S. Razvitije mietodov gidrologichieskikh prognozov i smiena ikh paradigmny / L. S. Kuchmient // Izbr. tr. In-ta vodnyh problem RAN: 1967–2017 : v 2-kh t. – M. : KURS, 2017. – T. 2. – S. 5–24.
2. Bolgov, M. V. Stokhastichieskaja gidrologija: razvitije osnovnykh idiej v Rossii / M. V. Bolgov // Viestn. S.-Pietierb. un-ta. Nauki o Ziemlie. 2021. – № 66 (1). – S. 19–40.

3. Volchik, A. A. Mnogolietniaja izmienchivost' stoka riek Bielarusi v uslovijakh izmienenija klimata i antropogiennykh vozdeystvij / A. A. Volchik, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk // Aktual'nyje nauchno-tiekhnichieskije i ekologichieskije problimy sokhranienija sriedy obitanija : sb. tr. IV Miezhdunar. nauch.-prakt. konf., posviashch. 55-letiju Brest. gos. tiekhn. un-ta i 50-letiju fak. inzhenernykh sistiem i ekologii, Brest, 7–8 okt. 2021 g. / Brest. gos. tiekhn. un-t ; riedkol.: A. A. Volchik [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2021. – S. 101–113.

4. Raschiotnyje gidrologichieskije kharakteristiki. Poriadok opriedielienija = Razlikovyja hidralahichnyja kharaktarystyki. Paradak vyznachennia : TKP 45-3.04-168-2009(02250). – Minsk : Strojtiekhnorm, 2010. – 55 s.

5. Volchak, A. A. Statistical assessment of the runoff time series homogeneity of the rivers in Belarus / A. A. Volchak, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk // Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3 (126). – С. 92–95.

6. Volchik, A. A. K voprosu o raspriedielienii razlichnykh vidov stoka / A. A. Volchik, S. V. Sidak // Aktual'nyje problimy nauk o Ziemle: ispol'zovaniye prirodnykh riesurov i sokhranienije okruzhajushchiej sriedy : sb. materialov V Miezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 27–29 sient. 2021 g. : v 2 ch. / In-t prirodopol'zovaniya NAN Bielarusi, Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina, Brest. gos. tiekhn. un-t ; riedkol.: S. A. Lysienko, M. A. Bogdasarov, A. A. Volchik. – Brest : BrGU, 2021. – Ch. 2. – S. 27–31.

7. Volchik, A. A. Uchiot raspriedielienija maksimal'nykh znachienij riechnogo stoka pri riestavracii istoriko-kul'turnykh cennostiej / A. A. Volchik, S. V. Sidak // Riostavracija istoriko-kul'turnykh objektov kak sokhranienije kul'turnogo nasliedija Riespubliki Belarus' : sb. st. nauch.-tiekhn. sieminara, Brest, 30 sient. 2020 g. / Brest. gos. tiekhn. un-t ; riedkol.: Ye. A. Tur [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2020. – S. 35–39.

8. Volchik, A. A. K voprosu issliedovaniya gidromieteorologichieskikh riadov mietodami fraktal'nogo analiza / A. A. Volchek, S. V. Sidak // Sovriemiennyje problimy gidromieteorologii i monitoringa okruzhajushchiej sriedy na prostranstvie SNG : tez. dokl. miezhdunar. nauch.-prakt. konf. – SPb. : RGGMU, 2020. – S. 321–323.

9. Hurst, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs / H. E. Hurst // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. – 1951. – Nr 116. – P. 770–808.

10. Volchik, A. A. Fraktal'nyj analiz riadov riechnogo stoka / A. A. Volchik, S. V. Sidak // Komplieksnyje problimy tiekhnosfiernoj biezopasnosti. Nauchnyj i praktichieskij podhody k razvitiju i rializacii tiekhnologij biezopasnosti : sb. st. po materialam XVII Miezhdunar. nauch.-prakt. konf., Voroniez, 26 marta 2021 g. / Voroniez. gos. tiekhn. un-t ; riedkol.: P. S. Kuprijenko (otv. ried.) [i dr.]. – Voroniez : VGTU, 2021. – S. 362–367.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 13.01.2022

УДК 504.064.37:528.8

Николай Васильевич Клебанович¹, Дмитрий Андреевич Кислицын²
*¹д-р с.-х наук, проф., проф. каф. почвоведения и геоинформационных систем
Белорусского государственного университета
²студент 4-го курса факультета географии и геоинформатики
Белорусского государственного университета*
Nikolai Klebanovich¹, Dmitry Kislitsyn²
*¹Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Professor of the Department of Soil Science and Geoinformation Systems
of the Belarusian State University
²4-th Year Student of the Faculty of Geography and Geoinformatics
of the Belarusian State University*
e-mail: ¹n_klebanovich@inbox.ru, ²dimas_13082000@mail.ru

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВЫХ РАЙОНОВ БРЕСТСКОГО ПОЛЕСЬЯ)

Подробно рассмотрены особенности почвенно-растительного покрова территории ключевых районов Брестского Полесья (Брестский, Жабинковский, Кобринский, Малоритский) в период с 1989 по 2020 г. на основе автоматизированного дешифрирования космических снимков со спутниковых систем Landsat и Sentinel. Для классификации космоснимков в ArcGIS 10.8.1 использован метод максимального правдоподобия, а генерализация результатов дешифрирования и их векторизация проводилась с помощью авторских инструментов геообработки в ModelBuilder. Использование данных о рельефе исследуемой территории (уклон) и вегетационного индекса NDVI позволило повысить достоверность векторных результатов классификации. Оценена точность автоматизированного дешифрирования космоснимков Landsat и Sentinel (апрель 2020 г.) с помощью 350 произвольно расположенных точек, составившая 80–90 % для большинства видов земель, для водных объектов – 100 %.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование, почвенно-растительный покров, Брестское Полесье, NDVI.

Analysis of Soil and Vegetation Cover Features on the Remote Sensing Data (by the Example of the Brest Polesye's Key Districts)

The article discusses in detail the features of the soil and vegetation cover of the territory of key districts of the Brest Polesye (Brest, Zhabinka, Kobrin, Malorita) in the period from 1989 to 2020 based on automated interpretation of satellite images from Landsat and Sentinel satellite systems. To classify satellite images in ArcGIS 10.8.1, the maximum likelihood method was used, and the generalization of the interpretation results and their vectorization was carried out using author's geoprocessing tools in ModelBuilder. The use of data on the relief of the study area (slope) and the vegetation index NDVI made it possible to increase the reliability of the vector classification results. The accuracy of the automated interpretation of Landsat and Sentinel satellite images (April 2020) was evaluated using 350 randomly located points, which amounted to 80–90% for most types of land, for water bodies – 100%.

Key words: automated interpretation, land cover, Brest Polesye, NDVI.

Введение

В настоящее время методы автоматизированного дешифрирования многозональных космоснимков становятся востребованными в различных отраслях (почвоведение, землеустройство, география, сельское хозяйство и др.), что подробно освещено во многих работах [1–4].

Самым важным этапом при проведении автоматизированного дешифрирования является классификация космоснимков, которая определяется как автоматическое разде-

ление растрового изображения по заданным признакам на классы объектов (как природных, так и антропогенных), т. е. происходит выделение объектов в основном по яркостным признакам. Классификация позволяет трансформировать яркостные значения пикселов изображения в контуры, которые необходимо проанализировать, а затем провести генерализацию и оценку точности.

Цель исследования – проанализировать особенности структуры и динамику почвенно-растительного покрова территории Брестского Полесья на основе использования данных дистанционного зондирования (космоснимки Landsat, Sentinel) и дополнительных сведений (уклон рельефа, вегетационный индекс NDVI), а также оценить точность дешифрирования.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является почвенно-растительный покров территории четырех ключевых районов Брестского Полесья (Брестский, Жабинковский, Кобринский, Малоритский районы Брестской области), которые характеризуются преимущественно равнинным рельефом с невысокими значениями уклонов и заметной неоднородностью почв. В работе были использованы космоснимки, полученные со спутниковых систем Landsat (апрель – май 1989, 2000, 2009, 2020 гг.) и Sentinel (апрель 2020 г.), которые находятся в открытом доступе в электронном архиве Геологической службы США [5].

Атмосферная коррекция для материалов со спутника Sentinel 2A проводилась с помощью специального модуля «Semi-Automatic Classification Plugin» в QGIS 3.10.2. Для космоснимков со спутников Landsat 5 и Landsat 7 (уровень обработки Collection 2 Level 2) атмосферная коррекция дополнительно не выполнялась, т. к. этот уровень обработки содержит данные, которые уже готовы для проведения спектрального анализа.

Использование растрового продукта Pansharpen для космоснимка Landsat 8 позволяет улучшить пространственное разрешение с 30 до 15 м, что заметно увеличивает детальность при проведении автоматизированного дешифрирования. Создание мозаики космоснимков проводилось в ArcGIS Pro 2.7 с помощью функции Mosaic raster.

Автоматизированное дешифрирование методом максимального правдоподобия в ArcGIS 10.8.1 проводилось с помощью созданных нами ранее инструментов геообработки в ModelBuilder, которые вначале позволяют классифицировать космоснимок с минимальным уровнем генерализации, чтобы визуально оценить степень достоверности классифицированного растра, а затем провести существенную генерализацию и векторизацию результата дешифрирования [6]. Вегетационный индекс NDVI рассчитывался с помощью калькулятора растров в ArcGIS 10.8.1.

Результаты и их обсуждение

Для изучения динамики и анализа особенностей почвенно-растительного покрова исследуемой территории на основе данных дистанционного зондирования нами было выделено 9 основных классов объектов: водные объекты; населенные пункты, коммуникации, дороги; прочие земли; лесные и под древесно-кустарниковой растительностью земли на минеральных почвах; лесные и под древесно-кустарниковой растительностью земли на торфяно-болотных почвах; сельскохозяйственные земли на минеральных почвах; сельскохозяйственные земли на торфяно-болотных (реже аллювиальных) почвах; земли под болотами; сельскохозяйственные земли на дегроторфяных почвах.

Для уточнения результатов автоматизированного дешифрирования в векторном формате использовались такие дополнительные сведения, как уклон рельефа и вегетационный индекс NDVI.

Для расчета уклонов нами была создана цифровая модель рельефа методом Топо в растр, которая является гидрологически корректной и учитывает не только отметки высот и горизонтали, но и расположение водотоков и водоемов.

При автоматизированном дешифрировании почвенно-растительного покрова Брестского Полесья площадь сельскохозяйственных и лесных земель на торфяно-болотных почвах чаще всего получается в определенной степени завышенной из-за широко распространения на данной территории дерновых заболоченных почв, которые имеют близкие спектральные характеристики с гидроморфными почвами, значения уклонов можно применить при редактировании векторного результата классификации с помощью инструмента «Зональная статистика» в таблицу.

В то же время не всегда по спектральной яркости можно четко разграничить лесные земли на торфяно-болотных почвах и земли под болотами между собой, поэтому для данной цели можно использовать вегетационный индекс NDVI, значения которого для земель под болотами (например, до 0,13–0,14 в начале апреля) ниже, чем для лесных земель на торфяно-болотных почвах.

Определение сельскохозяйственных земель на дегроторфяных почвах на космоснимках можно проводить с помощью сегментации, когда их площадь относительно небольшая по сравнению со всей площадью сегментов, выделенных на космоснимке, и сегменты выделенного класса не имеют значительных между собой спектральных различий (использован для периода с 1989 по 2009 г.), или на основе данных о вегетационном индексе NDVI с использованием выделенных автоматизированным дешифрированием осушенных органогенных почв (например, значения NDVI для дегроторфяных почв в начале апреля в основном составляют до 0,19).

В целом на территории Брестского Полесья торфяно-болотные почвы расположены в основном в южной части Кобринского района и северо-восточной и юго-западной частях Малоритского района. Удельный вес сельскохозяйственных земель несколько увеличился в период с 1989 по 2000 г. (с 50,7 до 51,9 %), что, возможно, связано с мелиоративным освоением юго-восточной части Кобринского района (рисунок 1).

С 2000 по 2009 г. произошло снижение сельскохозяйственной освоенности Брестского Полесья из-за перевода низкопродуктивных сельскохозяйственных земель под лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью (рисунки не приведены из-за ограничений по размеру статьи).

На космоснимках Landsat и Sentinel за 2020 г. обнаружено небольшое увеличение площади сельскохозяйственных земель, что обусловлено более высоким пространственным разрешением космоснимков Landsat 8 (с паншарпенингом) и Sentinel 2, которое позволяет более детально разделять границы застроенных территорий населенных пунктов и сельскохозяйственных земель (рисунки 2–3).

Площадь торфяно-болотных почв немного выросла только в период с 1989 по 2000 г. (в основном за счет юго-восточной части Кобринского района), а затем началось постепенное снижение, что обусловлено постепенным уменьшением мощности слоя торфа и содержания органического вещества, которое приводит к заметному увеличению площади дегроторфяных почв (с 1989 по 2020 г. – в 2,1 раза).

Площадь лесных и под древесно-кустарниковой растительностью земель в 1989–2000 гг. составляла около 35 %, а к 2009 г. наблюдался некоторый рост их удельного веса с уменьшением доли сельскохозяйственных земель.

В структуре этих земель характерно преобладание минеральных почв, но в Кобринском районе заметен более высокий удельный вес лесных земель на торфяно-болотных почвах по сравнению с исследуемой территорией в целом. Доля таких земель несколько уменьшилась (с 12,1 % в 1989 г. до 11,3 % в 2020 г.).

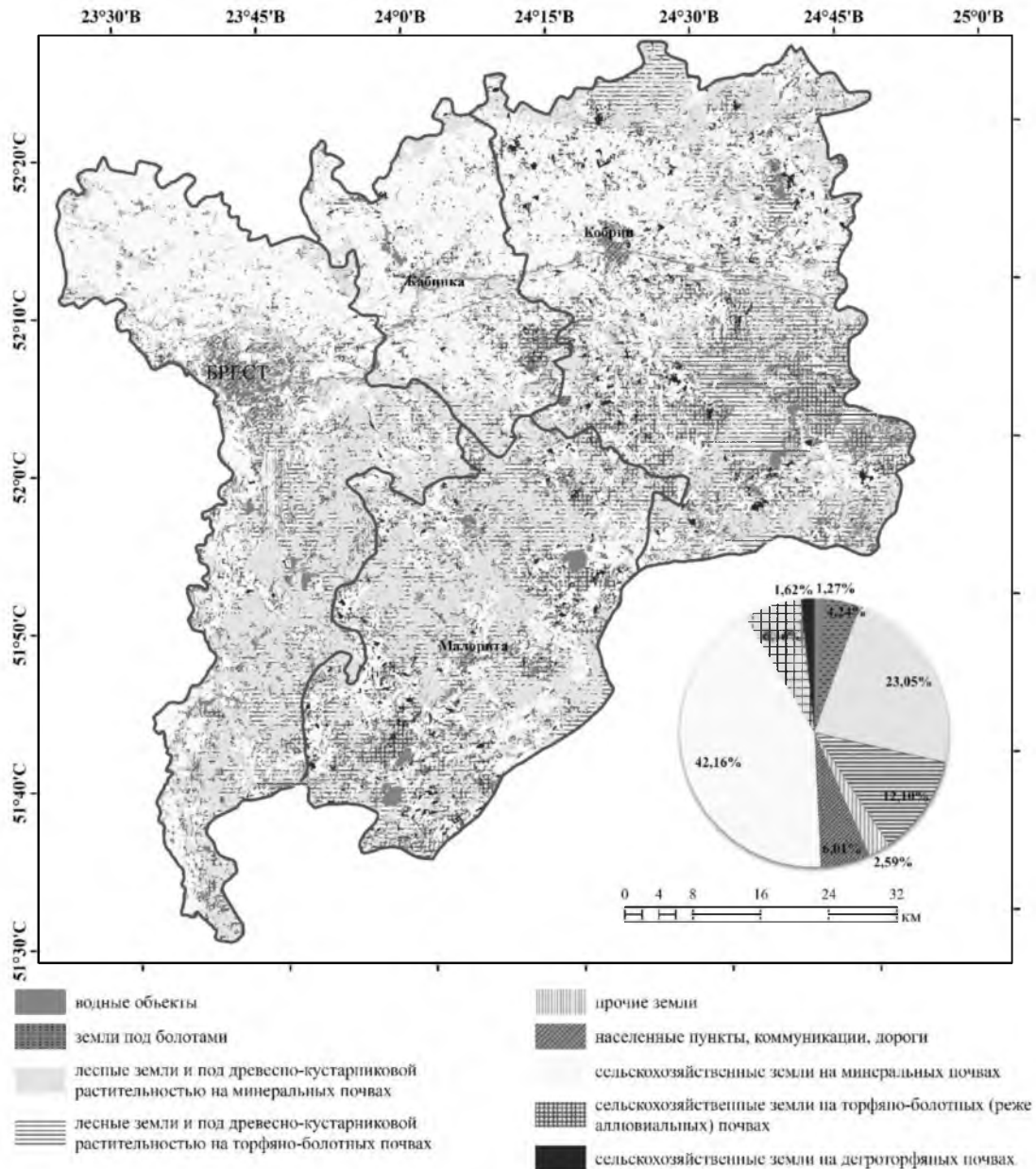


Рисунок 1. – Структура почвенно-растительного покрова территории Брестского Полесья в 1989 г. (на основе космоснимка *Landsat 5*)

Удельный вес земель, занятых населенными пунктами, коммуникациями, дорогами, составляет в среднем за период 2000–2021 гг. около 4,4–4,8 %, что несколько меньше по сравнению с 1989 г. (6,0 %), т. к. на точность определения территорий населенных пунктов предположительно повлияло худшее пространственное разрешение снимков 1989 г. Площадь водных объектов с 1989 по 2000 г. увеличилась незначительно (с 1,3 до 1,4 %), что может быть обусловлено созданием новых прудов и водохранилищ на осушенных территориях, но к 2020 г. произошло некоторое уменьшение площади из-за снижения уровня воды в водоемах (рисунки 2, 3).

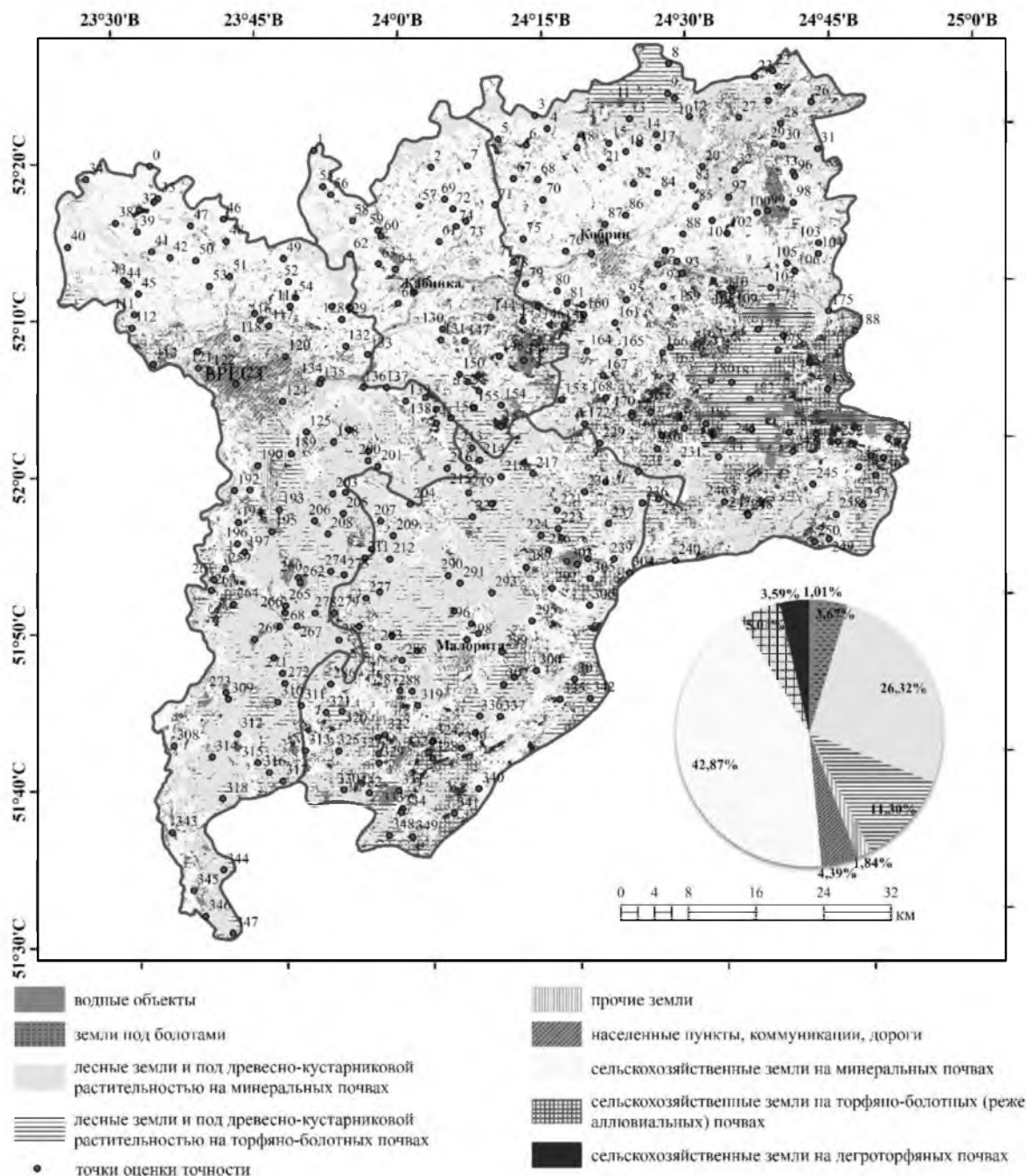


Рисунок 2. – Структура почвенно-растительного покрова территории Брестского Полесья в 2020 г. (на основе космоснимка Landsat 8)

Земли под болотами занимают 3–4 % территории Брестского Полесья и наибольшая их концентрация характерна для восточной части Кобринского района, а в период с 1989 по 2009 г. их удельный вес в структуре почвенно-растительного покрова составлял 4,2–4,4 %, но к 2020 г. наблюдается некоторое снижение их площади, что, возможно, связано с увеличением общей площади земель лесных и под древесно-кустарниковой растительностью (рисунок 3).

Использование матрицы ошибок позволяет получить информацию о пропорции правильной классификации, которая рассчитывается путем деления правильно идентифицированных пикселей (по диагонали матрицы) на общее количество выбранных пикселей [1].

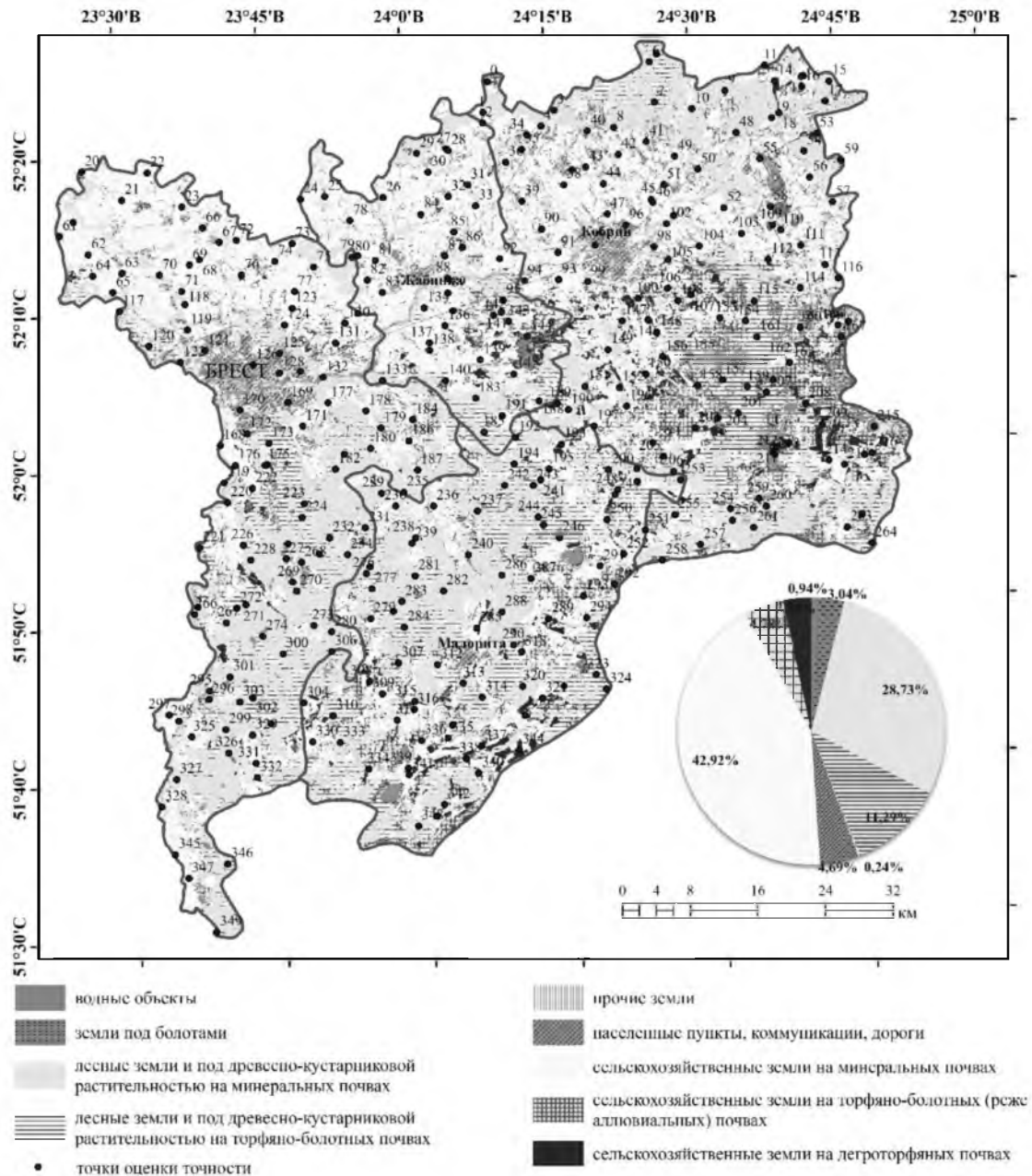


Рисунок 3. – Структура почвенно-растительного покрова территории Брестского Полесья в 2020 г. (на основе мозаики космоснимков *Sentinel 2*)

Для оценки точности автоматизированного дешифрирования методом максимального правдоподобия космоснимка Landsat 8 (06.04.2020) и мозаики космоснимков Sentinel 2 (06.04.2020) нами были созданы два shp-файла, которые содержат по 350 произвольно расположенных точек с помощью инструмента «Создать точки оценки точности». Построение матрицы ошибок в ArcGIS 10.8.1 основано на использовании инструмента «Вычислить матрицу несоответствий». Оценка точности проводилась на основе базы данных «Торфяники Беларуси» [7], геопортала ЗИС [8] и районных почвенных карт масштаба 1 : 50 000. Общая точность автоматизированного дешифрирования методом максимального правдоподобия для космоснимка Landsat 8 составила 80,3 %, а коэффициент каппа Коэна – 0,7332 (рисунок 4). При этом достаточно высокие значения пользовательской точности (более 90 %) характерны для водных объектов и лесных земель на минеральных почвах, а невысокие значения (менее 60 %) имеют земли под болотами

и прочие земли, что связано с заметными различиями спектральной яркости для объектов внутри данных классов. Производственная точность имеет наибольшие значения для лесных и под древесно-кустарниковой растительностью земель на торфяно-болотных почвах и сельскохозяйственных земель на минеральных почвах (более 87 %).

OID	Class Value	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	Total	U Accuracy	Каппа
0	C 1	9	1	0	0	0	0	0	0	0	10	0.9	0
1	C 2	0	9	0	1	0	3	1	0	0	14	0.642857	0
2	C 3	0	0	5	0	0	3	0	0	1	9	0.555556	0
3	C 4	2	1	0	83	1	2	1	2	0	92	0.902174	0
4	C 5	0	0	0	9	26	2	0	1	0	38	0.684211	0
5	C 6	0	5	6	5	1	122	7	2	0	148	0.824324	0
6	C 7	0	0	0	1	0	4	12	0	0	17	0.705882	0
7	C 8	0	0	0	2	0	1	1	7	1	12	0.583333	0
8	C 9	0	0	0	0	0	2	0	0	8	10	0.8	0
9	Total	11	16	11	101	28	139	22	12	10	350		0
10	U Accuracy	0.8181	0.5625	0.4545	0.8217	0.9285	0.8776	0.5454	0.5833	0.8	0	0.802857	0
11	Каппа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.7332

Примечание – C 1 – водные объекты; C 2 – населенные пункты, коммуникации, дороги; C 3 – прочие земли; C 4 – лесные земли и под древесно-кустарниковой растительностью на минеральных почвах; C 5 – лесные земли и под древесно-кустарниковой растительностью на торфяно-болотных почвах; C 6 – сельскохозяйственные земли на минеральных почвах; C 7 – сельскохозяйственные земли на торфяно-болотных (реже аллювиальных) почвах; C 8 – земли под болотами; C 9 – сельскохозяйственные земли на дегроторфяных почвах.

Рисунок 4. – Матрица ошибок автоматизированного дешифрирования космоснимка Landsat 8

Для космоснимка Sentinel 2 точность автоматизированного дешифрирования методом максимального правдоподобия составила 81,7 %, а коэффициент каппа Коэна – 0,7484. При этом значения пользовательской точности изменяются от 57–58 % для прочих земель и лесных земель до 90,1 и 100 % для лесных земель на минеральных почвах и водных объектов соответственно. Общая точность автоматизированного дешифрирования для мозаики космоснимков Sentinel 2 выше, чем для космоснимка Landsat 8, что, видимо, обусловлено различиями в пространственном разрешении (10 и 15 м соответственно).

Заключение

На основе автоматизированного дешифрирования методом максимального правдоподобия космоснимков Landsat и Sentinel с использованием программных комплексов ArcGIS 10.8.1 и ArcGIS Pro 2.7 получена и проанализирована информация об основных классах почвенно-растительного покрова и земельного фонда территории Брестского Полесья. Использование данных о рельефе (значения уклонов) и растительности (NDVI) позволило заметно улучшить картосхемы почвенно-растительного покрова и заметно повысить достоверность определения ареалов дегроторфяных и торфяно-болотных почв. Точность итоговых результатов дешифрирования для космоснимков Landsat и Sentinel (апрель 2020 г.), оцененная с помощью двух матриц ошибок, составила 80 и 82 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Principles of Remote Sensing. An Introductory Textbook. ITC Educational Textbook Series / edit. board: N. Kerle [et. al.]. – Enschede : International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009. – 591 p.

2. Арутюнян, Т. А. Мониторинг процессов деградации земель сельскохозяйственного назначения [Электронный ресурс] / Т. А. Арутюнян, Е. А. Устинова // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов. – Режим доступа: <http://kadastr.org/conf/-2016/pub/kadastr/monit-process-degrad-zem-sh naznacheniya.htm>. – Дата доступа: 01.02.2022.
3. Горбачева, Е. Н. Автоматизированное дешифрирование почв, подверженных водно-эрозионным процессам / Е. Н. Горбачева // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 1 (46). – С. 46–55.
4. Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic [Electronic resource] / D. Žižala [et al.] // Europ. Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 52, is. sup. 1. – P. 108–122. – DOI: 10.1080/22797254.2018.1482524.
5. Архив Геологической службы США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. – Дата доступа: 07.02.2022.
6. Кислицын, Д. А. Создание инструментов геообработки в ModelBuilder для проведения автоматизированного дешифрирования [Электронный ресурс] / Д. А. Кислицын // Материалы Междунар. молодеж. науч. форума «Ломоносов – 2021». – Режим доступа: https://lomonosov_msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22461/124296_uid563610_report.pdf. – Дата доступа: 05.02.2022.
7. База данных «Торфяники Беларуси» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.peatlands.by/>. – Дата доступа: 10.02.2022.
8. Геопортал ЗИС (раздел «Открытые данные») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gismap.by/next/>. – Дата доступа: 10.02.2022.

REFERENCES

1. Principles of Remote Sensing. An Introductory Textbook. ITC Educational Textbook Series / edit. board: N. Kerle [et. al.]. – Enschede : International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009. – 591 p.
2. Arutiunian, T. A. Monitoring processov diegradacii ziemiel' siel'skokhoziajstviennogo naznachienija [Eliكتروнный ресурс] / Т. А. Арутюнян, Е. А. Устинова // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов. – Режим доступа: <http://kadastr.org/conf/-2016/pub/kadastr/monit-process-degrad-zem-sh naznacheniya.htm>. – Дата доступа: 01.02.2022.
3. Gorbachiova, Ye. N. Avtomatizirovannoje dieshifrirovanije pochv, podvierzhennykh vodno-erozionnym processam / Ye. N. Gorbachiova // Pochvoviedeniye i agrokhimija. – 2011. – № 1 (46). – S. 46–55.
4. Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic [Electronic resource] / D. Žižala [et al.] // Europ. Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 52, is. sup. 1. – P. 108–122. – DOI: 10.1080/22797254.2018.1482524.
5. Arkhiv Geologichieskoj sluzhby SShA [Eliكتروнный ресурс]. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. – Дата доступа: 07.02.2022.
6. Kislicyn, D. A. Sozdaniye instrumentov gieoobrabotki v ModelBuilder dlia proviedienija avtomatizirovannogo dieshifrirovaniya / D. A. Kislicyn // Matierialy Miezhdunar. molodiozh. nauch. foruma «Lomonosov – 2021» [Eliكتروнный ресурс]. – Режим доступа: https://lomonosov_msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22461/124296_uid563610_report.pdf. – Дата доступа: 05.02.2022.
7. Baza dannykh «Torfianiki Bielarusi» [Eliكتروнный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.peatlands.by/>. – Дата доступа: 10.02.2022.
8. Geoportals ZIS (razdiel «Otkrytye dannye») [Eliكتروнный ресурс]. – Режим доступа: <https://gismap.by/next/>. – Дата доступа: 10.02.2022.

УДК 550.4:551.4 (476)

Ольга Антоновна Климович

*аспирант 3-го года обучения лаборатории оптимизации геосистем
Института природопользования Национальной академии наук Беларуси*

Olga Klimovich

*3-rd Year Post-Graduate Student of the Geosystems Optimization Laboratory
of Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus*

e-mail: olga_mazec@mail.ru

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ ПОЙМЫ РЕКИ МУХАВЕЦ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА БРЕСТА

Проведены химико-аналитические исследования почв пойменной территории р. Мухавец в черте г. Бреста. Исследованы и проанализированы такие показатели, как кислотность (по KCl), влажность, зольность, содержание органического вещества, а также валовое содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов. Выделены факторы воздействия на почвенный покров в черте города.

Ключевые слова: *пойма, почва, загрязнение, тяжелые металлы, нефтепродукты.*

Geoecological Assessment of Soils in the Floodplain of the Mukhavets River Within the City Limits of Brest

Chemical and analytical studies of the soils of the floodplain territory of the Mukhavets River in the city of Brest were carried out. Such indicators as acidity (by KCl), moisture, ash content, organic matter content, gross content of heavy metals and petroleum products were analyzed. The factors of impact on the soil cover in the city limits were identified.

Key words: *floodplain, soil, pollution, heavy metals, petroleum products.*

Введение

Городские территории на современном этапе испытывают высокую антропогенную нагрузку, в результате чего отмечается трансформация и загрязнение всех компонентов природного комплекса (воздушного бассейна, почв, водных объектов, биоты). Выбросы промышленных предприятий и транспорта, отходы производства и потребления, поверхностный сток с городской территории вносят основной вклад в техногенные потоки загрязняющих веществ в городах [20].

Речные долины являются неотъемлемой частью городской территории. В Республике Беларусь насчитывается 115 городов, которые расположены на реках (от одной до трех), и лишь в 17 городах реки расположены за пределами городской территории [11].

С позиций инженерно-геологических условий для градостроительного освоения поймы рек относятся к участкам, непригодным для строительства, в связи с возможностью возникновения катастрофических инженерно-геологических процессов [20].

В то же время в ландшафтно-планировочной структуре городской территории речные долины и их поймы выполняют роль главного элемента экологического каркаса города, вокруг которого формируются значительные по площади рекреационные территории. При этом поймы, особенно заболоченные, наряду с городскими болотами, относятся к одним из немногих природных комплексов, которые на территории города сохранились в относительно не нарушенном состоянии, т. к. использование данных территорий в градостроительстве ограничивается высоким уровнем грунтовых вод и опасностью затопления в период половодий и паводков. При этом оценка почв речных долин содержит два аспекта: первый ориентирован на градостроительное освоение природного ландшафта, второй – на его охрану в условиях нарастающего антропогенного воздействия. Ис этих позиций качество пойменных почв прямым образом будет влиять

на их функциональное использование при застройке городской территории, а также на структуру и состояние растительности расположенных на участках пойм ландшафтно-рекреационных территорий.

Также важным фактором загрязнения поймы является рельеф, т. к. пойма гипсометрически понижена относительно других городских территорий. Количество источников загрязнения почв пойм в силу ее расположения больше, чем для других территорий: трансграничные и местные аэральные выпадения, поверхностный сток с вышележащих территорий, точечные источники загрязнения, расположенные в пойме и долине реки, а также паводковые воды, поступающие на пойму при разливе водотока.

Следует учесть, что в процессе функционирования города происходит не только загрязнение, но и нарушение структуры и целостности почвенного покрова и биоты пойменных территорий.

В этой связи целью настоящего исследования является оценка и анализ состояния почвенного покрова пойменной территории р. Мухавец в черте г. Бреста.

Материалы и методы исследования

Анализ состояния почвенного покрова в пойме реки Мухавец на территории Бреста проведен на основании результатов геохимического исследования почвенных образцов, данных Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [14] и данных Центра международных экологических проектов, сертификации и аудита «Экологияинвест» [22]. Отбор почвенных образцов и их химико-аналитические исследования проведены в 2015 и 2017 гг. В отобранных образцах определялся широкий спектр показателей: влажность, зольность, содержание органического вещества, рН, тяжелые металлы (Cd, Zn, Pb, Cu, Ni) и нефтепродукты.

Работа по оценке загрязнения пойменных почв проводилась в три этапа: подготовительный, полевой и камеральный.

Подготовительный этап включал выделение поймы (с учетом данных о геолого-геоморфологическом строении территории г. Бреста, карты четвертичных отложений, почвенной карты, гидрологического режима р. Мухавец, структуры растительного покрова), а также выделения на картографической основе выделов, однородных по структуре и факторам воздействия на них. В подготовительный период были намечены участки поймы для отбора почвенных образцов.

Полевой этап включал рекогносцировку местности, закладку геохимического профиля. Отбор проб производился согласно [4; 5] методом прикопки (первый этап) и методом «конверта» (второй этап). На первом этапе был отобран 51 образец (для определения в них гранулометрического состава почв и водорастворимых соединений, влажности, кислотности и содержания органического вещества). На втором этапе было отобрано 18 образцов (для определения валового содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов – поллютантов, которые наиболее часто встречаются в урбанизированных условиях [21]).

Камеральный этап – это подготовка отобранных проб и их химико-аналитические исследования. Данные исследования проводились в аккредитованных лабораториях Института природопользования НАН Беларуси и Полесского аграрно-экологического института. Влажность почвенной пробы определялась методом высушивания почвенных образцов согласно [9], зольность – согласно ГОСТ 27784-88 «Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв» [7]. Кислотность определена методом приготовления солевой вытяжки [6].

Химический анализ валового содержания тяжелых металлов (Cd, Zn, Pb, Cu, Ni) в образцах почв проводился методом атомно-абсорбционной спектроскопии на аппарате SOLAAR MkII M6 Double Beam по стандартным методикам. Определение массовой доли

нефтепродуктов проводилось флуорометрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» [17].

Составление картосхем отбора почвенных образцов проведено в программе QGIS – свободной кроссплатформенной геоинформационной системе. Использовался точечный метод картографирования. Картографическая основа получена в веб-картографическом проекте OpenStreetMap (OSM).

Результаты исследования и их обсуждение

Почвенный покров поймы р. Мухавец во многом определяется тем, что г. Брест расположен в Южной (Полесской) почвенной провинции Юго-Западного округа Брестско-Дрогичинского-Ивановского района дерново-подзолистых заболоченных супесчаных почв. В условиях выровненной поверхности, образованной водно-ледниковыми и донно-моренными отложениями, для территории характерны дерново-подзолистые слабо глееватые почвы на супесях, подстилаемые моренными суглинками, реже песками, а также торфяно-болотные на аллювиальных песках. По гранулометрическому составу почвы в городе подразделяются на песчаные, супесчаные и суглинистые. Преобладающими почвообразующими породами являются пески и супеси водно-ледниковые и озерно-ледниковые [1].

Равнинный характер рельефа с небольшими плоскими понижениями, близость грунтовых вод и слабый сток на отдельных участках приводят к заболачиванию территории, поэтому на территории города встречается заторфованные поверхности низменных равнин [1]. Значительная доля заболоченных площадей расположена в пойме р. Мухавец, в меньшей мере – в пойме р. Зап. Буг.

Основное влияние на пойменную территорию р. Мухавец оказывает жилая застройка, транспорт, промышленные объекты. Следует отметить, что в непосредственной близости к самому руслу р. Мухавец, параллельно ему, расположены две автомобильные дороги. Также в пределах исследуемой территории расположена одна железнодорожная ветка и пересекающий русло железнодорожный мост.

Антропогенные факторы, которые воздействуют на почвы поймы в пределах города, условно можно разделить на четыре группы: *механические, физические, химические и биологические*.

Механическая трансформация почвенного покрова вследствие изменений рельефа сопровождается потерей почв (затопленные карьеры).

Физическая трансформация почвенного покрова в пойме р. Мухавец отмечается на местах интенсивной стихийной рекреации (разрушение плодородного слоя на тропах, вблизи стоянок, кострища, засорение бытовым мусором и др.).

Химическая трансформация сопровождается загрязнением почв токсичными загрязняющими веществами (солями, нефтепродуктами, тяжелыми металлами и др.), нарушением кислотно-щелочных условий, изменением окислительно-восстановительного потенциала. Строение почвенного профиля на таких участках характеризуется наличием химически-загрязненных горизонтов, которые выделяются на основании химико-аналитических исследований. Интенсивность и характер проявления данных факторов определяется структурой и характером землепользования (функциональными особенностями использования городской территории, расположением участка по отношению к источникам загрязнения городской среды).

Определение содержания органического вещества, а также показателей влажности, зольности, кислотности проводилось в 50 образцах почвенных проб, отобранных в пойме реки Мухавец в черте г. Бреста (рисунок 1).

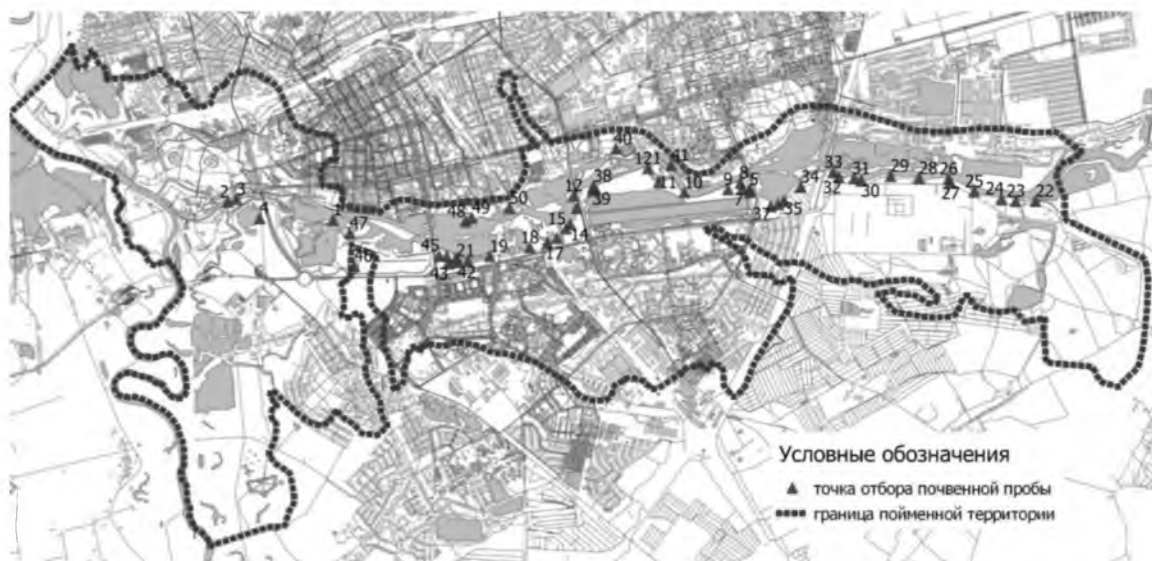


Рисунок 1. – Схема отбора почвенных образцов в пойме р. Мухавец (г. Брест) (первый этап)

Данные химико-аналитических исследований образцов показывают (таблица 1): варьирование pH_{KCl} почв составляет от 3,59 до 7,77 – от сильно кислых до слабощелочных. Слабощелочной показатель кислотности (pH_{KCl} 7,1–8,0) отмечается у 15 отобранных почвенных образцов (30%), средний показатель кислотности – 6,09 (нейтральный).

Согласно [2; 16] для ненарушенных почв Беларуси фоновый показатель реакции почвенной среды составляет 4,21–5,8. Величина кислотности корнеобитаемого слоя городских почв колеблется в широких пределах, но преобладают почвы с нейтральной и слабощелочной средой [2; 13; 20; 21]. В большинстве случаев реакция среды антропогенных почв выше, чем у природных [18; 19; 21]. Высокую щелочность почв большинство авторов [2; 20; 21] связывают с попаданием в почву через поверхностный сток и дренажные воды хлоридов кальция и натрия, а также других солей, которыми посыпают тротуары и дороги зимой. Другой причиной является высвобождение кальция из различных обломков, строительного мусора, цемента, кирпича и др., имеющих щелочную реакцию, а также поступление в почвы взвешенных частиц из воздуха (пыли).

Содержание органического вещества в городских почвах варьирует в широком диапазоне и зависит от содержания органических остатков в почве, а также от способа воздействия на почвенный покров и ухода за ним [12]. Изменение количества органического вещества в почве происходит с глубиной и может быть, как постепенным, так и скачкообразным.

Интервал варьирования содержания органического вещества в верхних слоях городских почв составляют от 1 до 8 % и более [21]. Согласно проведенным исследованиям почвенных образцов поймы реки Мухавец на территории г. Бреста, содержание органического вещества в них изменяется от 0,33 до 19,6 %, среднее значение – 4,39 %.

Минимальное значение содержания органического вещества наблюдается в песчаных и супесчаных почвах, отобранных вблизи железнодорожных и автомобильных насыпей, на возвышениях и др. Максимальное содержание – в почвенных образцах, отобранных на заболоченных территориях (территория заказника «Брестский») или на территориях с луговой растительностью, а также на участках с древесно-кустарниковой растительностью лиственных пород.

Таблица 1. – Результаты химико-аналитических исследований почвенного покрова поймы р. Мухавец (г. Брест)

№ пробы	pH (по KCl)	Кислотность	Влажность, %	Зольность, %	Содержание органического вещества в почве, %	№ пробы	pH (по KCl)	Кислотность	Влажность, %	Зольность, %	Содержание органического вещества в почве, %
1	7,77	слабощелочная	0,34	98,91	1,09	26	7,31	слабощелочная	0,25	99,02	0,98
2	6,47	нейтральная	3,61	91,06	8,94	27	7,58	слабощелочная	2,09	97,36	2,64
3	7,22	слабощелочная	1,8	95,94	4,06	28	5,21	слабокислая	0,49	98,54	1,46
4	6,33	нейтральная	2,51	89,38	10,62	29	3,8	сильнокислая	1,02	95,7	4,3
5	7,21	слабощелочная	0,33	99,01	0,99	30	6,12	нейтральная	1,2	95,54	4,46
6	6,61	нейтральная	0,18	99,59	0,41	31	7,16	слабощелочная	1,35	96,72	3,28
7	4,66	среднекислая	3,65	90,21	9,79	32	7,28	слабощелочная	1,63	95,58	4,42
8	7,11	слабощелочная	0,32	99,18	0,82	33	7,56	слабощелочная	1,71	94,49	5,51
9	5,81	слабокислая	2,62	96,17	3,83	34	4,87	среднекислая	0,37	98,53	1,47
10	6,54	нейтральная	0,87	97,24	2,76	35	4,83	среднекислая	1,09	96,01	3,99
11	6,97	нейтральная	0,8	98,65	1,35	36	4,61	среднекислые	0,37	99,17	0,83
12	7,11	слабощелочная	0,28	99,36	0,64	37	3,59	сильнокислая	0,46	98,42	1,58
12.1	5,74	слабокислая	0,74	99,02	0,98	38	6,38	нейтральная	0,24	99,23	0,77
13	5,86	слабокислая	0,82	97,96	2,04	39	4,36	среднекислые	4	88,58	11,42
14	5,55	слабокислая	1,43	96,37	3,63	40	4,93	среднекислая	6,38	86,25	13,75
15	6,35	нейтральная	0,55	98,11	1,89	41	7,36	слабощелочная	4,07	87,63	12,37
16	4,93	среднекислая	0,24	99,51	0,49	42	6,16	нейтральная	2,73	96,09	3,91
17	5,9	слабокислая	0,12	99,67	0,33	43	7,23	слабощелочная	0,43	98,9	1,1
18	7,14	слабощелочная	0,37	99,13	0,87	44	4,65	среднекислая	0,71	98,04	1,96
19	4,62	среднекислая	1,76	97,67	2,33	45	5,73	слабокислая	1,79	96,2	3,8
20	6,43	нейтральная	5,3	80,4	19,6	46	6,83	нейтральная	4,91	88,32	11,68
21	5,16	слабокислая	2,65	93,7	6,3	47	5,42	слабокислая	6,4	88,16	11,84
22	7,12	слабощелочная	2,44	95,24	4,76	48	5,6	слабокислая	1,66	94,74	5,26
23	6,42	нейтральная	1,38	88,82	11,18	49	5,56	слабокислая	2,6	93,17	6,83
24	5,25	слабокислая	0,31	98,92	1,08	50	6,75	нейтральная	0,39	98,88	1,12
25	7,27	слабощелочная	0,67	97,65	2,35						

Определение валовой концентрации тяжелых металлов и массовой доли нефтепродуктов производилось в 18-ти почвенных образцах, отобранных в пойме р. Мухавец в г. Бресте (рисунок 2).

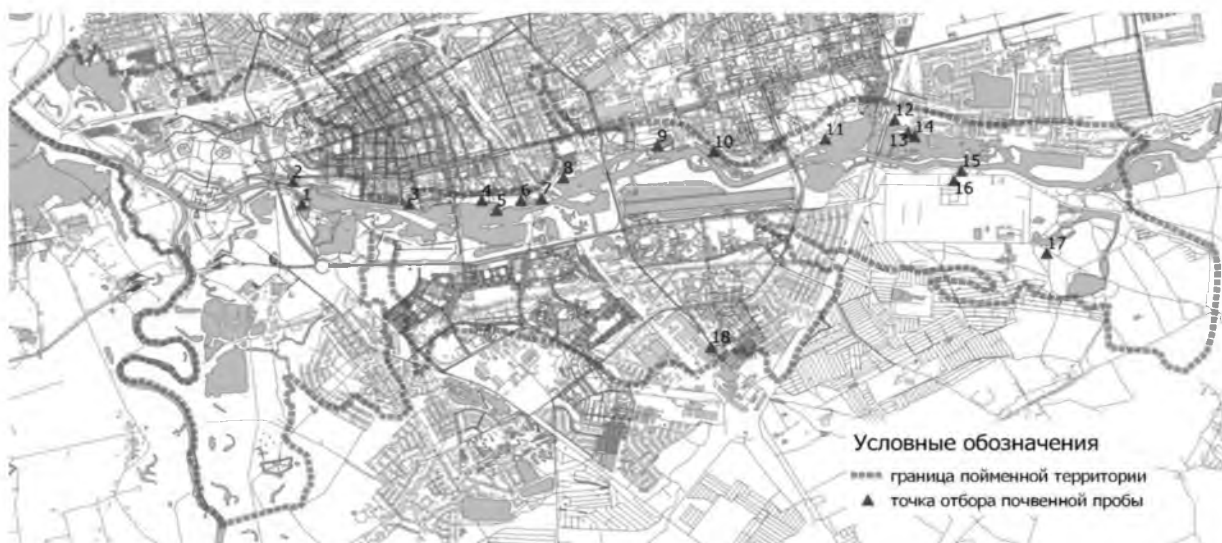


Рисунок 2. – Схема отбора почвенных образцов в пойме р. Мухавец (г. Брест) (второй этап)

Выбор участков исследования был обусловлен их размещением относительно источников воздействия. Для пойменной территории г. Бреста – это близость линейных инженерных сооружений (железнодорожные мосты и дороги, автомобильные мосты и дороги), жилищная застройка (многоквартирная и усадебная), места массового отдыха и промышленные объекты. Количество крупных промышленных предприятий в пределах поймы незначительно. В первую очередь это Брестская ТЭЦ, а также речной порт г. Бреста и ОАО «Цветотрон» (производство электроники; реорганизация и частичное закрытие предприятия).

Из 18 почвенных образцов два отобраны в зоне биологического заказника «Брестский» (особо охраняемая природная территория), один образец – на территории промышленной зоны (ОАО «Цветотрон») и 15 образцов – в ландшафтно-рекреационной зоне (набережная Ф. Скорины, территория мемориального комплекса «Брестская крепость-герой», городские пляжи № 1 и 3, места ловли рыбы). В качестве фонового значения были взяты данные Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь [14].

Анализ полученных данных (таблица 2) показывает, что концентрация кадмия в образцах, отобранных в ландшафтно-рекреационной зоне (ЛРЗ), превышает фоновое значение от 1,1 (№ 4, 9, 16) до 3,8 раза (№ 8); в четырех образцах (№ 1, 10, 11, 17) – ниже предела обнаружения. Образец почвы, отобранной в промышленной зоне (ПЗ) (№ 18) имеет концентрацию ниже предела обнаружения. В образцах № 13 и 14, отобранных на особо охраняемой природной территории (ООПТ) валовая концентрация элемента превышена в 1,3 и 3,7 раза соответственно. В обоих случаях данное превышение (в ЛРЗ и ООПТ) можно объяснить близостью железной дороги и существенным понижением рельефа в местах отбора почвенных образцов. Сравнение полученных величин с пороговыми значениями, которые показывают степень загрязнения земель, показало: во всех отобранных образцах загрязнения почв кадмием не зафиксировано.

Превышение валовой концентрации свинца относительно фонового содержания в 1,2–83,1 раза наблюдается в 13 из 15 образцов, отобранных в ЛРЗ, в двух образцах – концентрация в пределах нормы. Аномально высокая концентрация металла в образце

№ 7 (232,65 мг/кг) объясняется близостью железнодорожного полотна и особенностями рельефа (точка отбора расположена на пониженном относительно железнодорожного полотна участке). Загрязнение образца № 18 (128,8 мг/кг) объясняется его расположением на территории ОАО «Цветотрон» (выпуск электроники).

В образце № 6 (44,54 мг/кг) превышение над фоном незначительное и нетипично для данной территории (усадебная застройка, огород). Превышение концентрации в образцах № 13, 14 (ООПТ) (территория заказчика «Брестский») относительно фона в 3,1 и 4,5 раза соответственно объясняется близостью точек отбора к железнодорожной насыпи (железнодорожное полотно отсутствует). Оценка почв по сравнению с пороговыми значениями показала загрязнение почв в ландшафтно-рекреационной зоне в точке № 7 (232,65 мг/кг).

Оценка полученных данных по валовому содержанию цинка показала, что превышение концентрации цинка относительно фонового значения наблюдается в девяти образцах, отобранных в ЛРТ с превышением в 1,1–3,9 раза, что составляет 60 % от отобранных в данной функциональной зоне почв. Эти точки имеют непосредственную близость к старой усадебной застройке или расположены в локальном понижении рельефа относительно окружающей территории с усадебной застройкой. В точках, расположенных в ООПТ (№ 13 и 14), превышение относительно фона не наблюдается. Концентрация цинка в точке отбора № 18 (ПЗ) находится пределах фонового значения. Пороговые значения содержания химических веществ во всех функциональных зонах не превышены.

Валовое содержание меди в 53 % образцов ЛРЗ находятся в пределах фонового значения, в шести образцах превышение составляет от 1,2 до 9,2 раза. Значительное превышение фона (16,6 раза) и превышение порогового значения наблюдается в точке № 8 (63,06 мг/кг), расположенной вблизи автомагистрали. Здесь фиксируется низкая степень загрязнения почв.

Источником загрязнения в данном случае будет являться автомобильная дорога, находящаяся на существенном повышении рельефа.

В точках, расположенных в пределах ООПТ, превышение относительно фонового значения отмечено в точке № 14 (в 1,6 раза). Это можно объяснить близостью к насыпи старой железной дороги и расположением территории самого заказчика в значительном понижении рельефа. В промышленной зоне содержание меди низкое и находится в пределах фона и значительно ниже порогового значения.

Концентрация никеля относительно фонового значения в почвах ЛРЗ превышена в 10 образцах (в 1,3–12,8а раз), в пяти точка концентрация вещества находится в пределах фона. Превышение валовой концентрации никеля по сравнению с фоном в 12,8 раза в точке № 8 объясняется близостью гаражного кооператива. Также превышение концентрации относительно фона присутствует в точках отбора на ООПТ (в 1,7–3,7 раза) и ПЗ (1,6 раза). Пороговые значения содержания никеля не превышены.

Оценка содержания в почвах нефтепродуктов выявила их накопление во всех отобранных образцах во всех функциональных зонах, при этом превышение над фоном составило от 2,0 до 17,2 раза. Существенная концентрация отмечается в ЛРЗ в точках № 7 и 16 (17,2 и 15,1 раза соответственно). Это можно объяснить тем, что образец № 7 отобран на участке поймы вблизи железной дороги, а образец № 16 – вблизи автомобильной дороги местного значения, связывающей городскую территорию и садовые товарищества с постоянным проживанием.

В почвах ООПТ содержание нефтепродуктов превышает фоновое значение в 2,3 и 5,7 раза, в почвах ПЗ – 5,9 раза.

Показатель валовой концентрации нефтепродуктов не превысил пороговых значений для нефтепродуктов во всех функциональных зонах.

Таблица 2. – Валовая концентрация тяжелых металлов и нефтепродуктов в почвах поймы р. Мухавец (г. Брест), мг/кг

№ пробы	Функциональное назначение земель	Тип почвы	Нефтепродукты	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni
1	ЛРЗ*	супесчаная	12,70 (2)	< п. о.**	5,77 (2,1)	12,66	2,76	3,92 (3,6)
2	ЛРЗ	супесчаная	43,05 (6,6)	0,05	2,74	7,97	1,49	1,18
3	ЛРЗ	супесчаная	57,37 (8,8)	0,06	7,44 (2,7)	25,64 (1,3)	2,87	1,33
4	ЛРЗ	песчаная	91,39 (14)	0,08 (1,1)	13,52 (4,8)	38,66 (2)	4,42 (1,2)	2,77
5	ЛРЗ	супесчаная	60,05 (9,2)	0,21 (3)	11,8 (4,2)	47,05 (2,5)	7,11 (1,9)	6,45 (5,9)
6	ЛРЗ	супесчаная	84,44 (13)	0,15 (2,1)	44,54 (15,9)	73,69 (3,9)	34,94 (9,2)	3,69 (3,4)
7	ЛРЗ	супесчаная	111,97 (17,2)	0,06	232,65 (83,1)	55,47 (2,9)	5,58 (1,5)	2,07 (1,9)
8	ЛРЗ	супесчаная	63,49 (9,8)	0,27 (3,8)	13,53 (4,8)	102,5 (5,4)	63,06 (16,6)	14,1 (12,8)
9	ЛРЗ	супесчаная	61,59 (9,5)	0,08 (1,1)	4,65 (1,7)	21,57 (1,1)	3,65	3,12 (2,9)
10	ЛРЗ	супесчаная	25,98 (4)	< п. о.	1,24	4,99	0,77	0,51
11	ЛРЗ	супесчаная	53,37 (8,2)	< п. о.	3,49 (1,2)	7,76	1,9	1,41 (1,3)
12	ЛРЗ	супесчаная	41,82 (6,4)	0,09 (1,3)	4,04 (1,4)	35,68 (1,9)	7,51 (2)	1,74 (1,6)
13	ООПТ	суглинистая	36,97 (5,7)	0,09 (1,3)	8,61 (3,1)	5,24	3,06	1,88 (1,7)
14	ООПТ	суглинистая	15,27 (2,3)	0,26 (3,7)	12,51 (4,5)	12,89	6,09 (1,6)	4,04 (3,7)
15	ЛРЗ	супесчаная	96,12 (14,8)	0,11 (1,6)	7,86 (2,8)	37,72 (2)	5,07 (1,3)	4,23 (3,8)
16	ЛРЗ	супесчаная	97,68 (15,02)	0,08 (1,1)	6,55 (2,3)	18,25	3,03	3,58 (3,3)
17	ЛРЗ	супесчаная	21,53 (3,3)	< п. о.	5,67 (2)	3,66	0,85	0,56
18	ПЗ	супесчаная	38,17 (5,9)	< п. о.	128,8 (46)	8,77	2,69	1,74 (1,6)
Фоновое содержание по данным НСМОС [14], мг/кг			6,5	0,07	2,8	19,0	3,8	1,1
Пороговое значение, мг/кг [22]	ЛРЗ	супесчаная	282	1,50	68,5	154	54,5	35,7
	ООПТ	суглинистая	81,2	0,90	34,0	68,9	27,0	20,6
	ПЗ	супесчаная	1263	3,13	153	323	114	74,8

Примечание – * – ЛРЗ – ландшафтно-рекреационная зона; ПЗ – промышленная зона; ООПТ – особо охраняемая природная территория;

** – < п. о. – ниже предела обнаружения;

38,17 (5,9)

– точки отбора с превышением концентрации относительно показателя фонового содержания (в скобках – кратность превышения относительно фона, разы);

232,65 (83,1)

– точки отбора с превышением концентрации относительно показателя порогового значения.

Заклучение

1. Анализ содержания органического вещества, а также показателей влажности, зольности и кислотности показал, что показатель рН почв варьирует в широком диапазоне, по данному показателю почвы относятся к категориям от сильно кислых до слабощелочных, средний для исследованных почв показатель кислотности – нейтральный.

Процентное содержание органического вещества в пойменных почвах изменяется от 0,33 до 19,6 % со средним его значением, равным 4,39 %. Минимальное значение содержания органического вещества наблюдается в образцах песчаных и супесчаных почв, отобранных вблизи дорожных насыпей, на возвышениях и других участках. Максимальное значение зафиксировано в почвенных образцах, отобранных на заболоченных территориях и на территориях с луговой и древесно-кустарниковой растительностью.

2. Для 18 образцов почвы, отобранных в трех различных функциональных зонах, можно отметить следующее: на семи исследованных участках (точки отбора № 5, 6, 7, 8, 9, 12, 15) отмечено полиэлементное накопление металлов (по отношению к фоновой концентрации). Все эти участки относятся к ландшафтно-рекреационной функциональной зоне. На участках № 7 и № 8 отмечается превышение фонового значения по большинству исследуемым тяжелым металлам и нефтепродуктам, а также превышение порогового значения валовой концентрации свинца в точке № 7 (232,65 мг/кг) и меди в точке № 8 (63,06 мг/кг), что свидетельствует о низкой степени загрязнения почв данными металлами.

Превышение валовой концентрации металлов по отношению к фону на участках ООПТ (№13 и 14) (заказник «Брестский») можно объяснить близостью точек отбора к прилегающей вплотную усадебной застройке и расположением железнодорожной насыпи (не действует, насыпь на момент исследования уже отсутствовала).

Что касается участка в зоне воздействия промышленной зоны, основным элементом-загрязнителем пойменных почв является свинец, валовая концентрация которого относительно фона превышена в 46 раз (128,8 мг/кг).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухавец. Энциклопедия малой реки : монография / А. А. Волчек [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Полес. аграр.-экол. ин-т. – Брест : Академия, 2005. – 346 с.
2. Гантимуров, И. И. К вопросу о метаморфозе почв городов по данным наблюдений в г. Новосибирске / И. И. Гантимуров // Охрана природы на Урале : сб. ст. – Свердловск, 1966. – Вып. V. – С. 45–52.
3. Глазовская, М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов / М. А. Глазовская. – М. : Высш. шк., 1988. – 360 с.
4. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения : ГОСТ 17.4.1.02-83. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 4 с.
5. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб : ГОСТ 17.4.3.01–83 (СТ СЭВ 3847-82). – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 4 с.
6. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО : ГОСТ 26483. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 3 с.
7. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв : ГОСТ 27784-88. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
8. Почвы. Отбор проб : ГОСТ 28168–89. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 4 с.
9. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений : ГОСТ 28268-89. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.

10. Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь. – Режим доступа: http://www.gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/. – Дата доступа: 28.09.2021.
11. Группировка городов и поселков городского типа по численности населения на 1 января 2019 г. // Демогр. ежегодник – 2019 / И. В. Медведева [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2019. – С. 34.
12. Почвы и техногенные поверхностные образования в городских ландшафтах : монография / Г. В. Ковалева [и др.]. – Владивосток : Дальнаука, 2012. – 159 с.
13. Лепнева, И. И. Тяжелые металлы в почвах и растениях территории МГУ / И. И. Лепнева, А. И. Обухов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. – 1987. – № 1. – С. 36–42.
14. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: мониторинг земель (почв). – Минск : Бел НИЦ «Экология», 2020. – 69 с.
15. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта : учеб. пособие / А. И. Перельман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1975. – 341 с.
16. Петухова, Н. Н. Геохимия почв Белорусской ССР / Н. Н. Петухова. – Минск : Наука и техника, 1987. – 231 с.
17. Количественный химический анализ почв : ПНД-Ф 16.1:2.21-98. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 26 с.
18. Савченко, С. В. Воздействие городов Беларуси на эколого-геохимическое состояние пойменных экосистем / С. В. Савченко // Экологические и метеорологические проблемы больших городов и промышленных зон : материалы междунар. науч. конф. – СПб, 2002. – С. 57–59.
19. Смян, Н. И. Классификация почв / Н. И. Смян, И. Н. Соловей, Т. А. Романова // Почвы Белорусской ССР. – Минск, 1974. – С. 83–86.
20. Городская среда: геоэкологические аспекты : монография / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 301 с.
21. Хомич, В. С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик. – Минск : Минсктиппроект, 2004. – 260 с.
22. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в т. ч. почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах : ЭкоНиП 17.03.01-001-2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecoinv.by/images/pdf/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F_17.03.01-001-2020.pdf. – Дата доступа: 20.09.2021.

REFERENCES

1. Mukhavičec. Enciklopedija maloju rieki : monografija / A. A. Volčiek [i dr.] ; Nac. akad. nauk Bielarusi, Polies. agrar.-ekol. in-t. – Brest : Akadiemija, 2005. – 346 s.
2. Gantimurov, I. I. K voprosu o mietamorfozie pochv gorodov po dannym nabliudienij v g. Novosibirskie / I. I. Gantimurov // Okhrana prirody na Uralie : sb. st. – Sverdlovsk, 1966. – Vyp. V. – S. 45–52.
3. Glazovskaja, M. A. Geokhimija prirodnykh i tiekhnogiennykh landshaftov / M. A. Glazovskaja. – M. : Vyssh. shk., 1988. – 360 s.
4. Okhrana prirody. Pochvy. Klassifikacija khimichieskikh vieshchiestv dlja kontrolia zagriaznienija : GOST 17.4.1.02-83. – M. : Izd-vo standartov, 1983. – 4 s.
5. Okhrana prirody. Pochvy. Obschije tribovanija k otboru prob : GOST 17.4.3.01–83 (ST SEV 3847-82). – M. : Izd-vo standartov, 1983. – 4 s.
6. Pochvy. Prigotovlienije solievoju vytiazhki i opriedielienije jeju pH po mietodu CINA0 : GOST 26483. – M. : Izd-vo standartov, 1985. – 3 s.

7. Мiетод опрiедiленiя зол’ности торфiяных i оторфованных горизонтов почв : GOST 27784-88. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
8. Почвы. Отбор проб : GOST 28168-89. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 4 с.
9. Почвы. Мiетоды опрiедiленiя влажности, максимальной гигроскопической влажности i влажности устойчивого завиядания растений : GOST 28268-89. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.
10. Рieйестр зiемел’ных рiесурсов Рiеспублики Беларусь [Элиектронный рiесурс] // Gos. kom. po imushchiestvu Рiесп. Беларусь’. – Рieзхим доступа: http://www.gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/. – Data доступа: 28.09.2021 г.
11. Группировка городов i посiолков городского типа по численности населения на 1 января 2019 г. // Дiемогр. jeзheгодник – 2019 / I. V. Мiедвiедiева [i др.]. – Минск : Нac. stat. kom. Рiесп. Беларусь’, 2019. – С. 34.
12. Почвы i тiекhnогiенные повiерхностные образования в городских ландшафтах : монография / G. V. Kovaliova [i др.]. – Владивосток : Дал’наука, 2012. – 159 с.
13. Лiепниева, I. I. Тiазhелье мiеталлы в почвах i растениях территории МГУ / I. I. Лiепниева, A. I. Обухов // Вiестн. Моск. un-та. Сier. 17, Почвовiедiение. 1987. – № 1. – С. 36–42.
14. Национальная система мониторинга окрyзhающeй среды Рiеспублики Беларусь : мониторинг зiемел’ (почв). – Минск : Бел NIC «Экологiя», 2020. – 69 с.
15. Пiерiел’ман, A. I. Гiеохимия ландшафта : учеб. пособие / A. I. Пiерiел’ман. – 2-е изд., пiерiераб. i доп. – М. : Вyssh. shk., 1975. – 341 с.
16. Пiетухова, N. N. Гiеохимия почв Белорусской ССР / N. N. Пiетухова. – Минск : Наука i тiекhnика, 1987. – 231 с.
17. Колiчествiенный химический анализ почв : PND-F 16.1:2.21-98. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 26 с.
18. Савчиенко, S. V. Воздiеяствие городов Беларуси на экологию-гiеохимическую состоияние поймаемых экосистем / S. V. Савчиенко // Экологическiе i мiетeорологическiе проблемы бол’ших городов i промышлiенных зон : материалы мiеждунар. науч. конф. – SPb., 2002. – С. 57–59.
19. Смiеян, N. I. Классификация почв / N. I. Смiеян, I. N. Солovieй, T. A. Романова // Почвы Белорусской ССР. – Минск, 1974. – С. 83–86.
20. Городская среда: гiеоэкологическiе аспекты : монография / V. S. Homich [i др.]. – Минск : Беларусь. навyка, 2013. – 301 с.
21. Khomich, V. S. Экогiеохимия городских ландшафтов Беларуси / V. S. Khomich, S. V. Kakarieka, T. I. Kukharchik. – Минск : Minsktipprojeкт, 2004. – 260 с.
22. Охрана окрyзhающeй среды i природопол’зованiе. Зiемли (в т. ч. почвы). Нормативы качiества окрyзhающeй среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах : EkoNiP 17.03.01-001-2020 [Элиектронный рiесурс]. – Рieзхим доступа: http://www.ecoinv.by/images/pdf/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F_17.03.01-001-2020.pdf. – Data доступа: 20.09.2021.

Рукапи наступiю у рeдакцiю 10.11.2021

УДК 325.1+911.3 (476)

Александр Александрович Сидорович
канд. геогр. наук, доц., декан факультета естественных
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
Alexandr Sidorovich
*PhD in Geographical Sciences, Associate Professor,
Dean of The Faculty of Natural Sciences
of Brest State A. S. Pushkin University*
e-mail: brestsid@gmail.com

МИГРАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В РЕГИОНАХ БЕЛАРУСИ ПО ДАННЫМ СМЕЖНЫХ ПЕРЕПИСЕЙ 1989–2019 гг.*

Проведена оценка миграционной ситуации в разрезе районов Беларуси по данным смежных переписей населения 1989–2019 гг. Установлено, что регионами притяжения мигрантов выступают г. Минск и пристоличные районы Минской области. За счет миграционного фактора на 75 % возросла численность населения Минского района, на 23 % – Дзержинского и Смолевичского. В 1989–1999 гг. миграционный отток населения из районов Гомельской и Могилевской областей, пострадавших от аварии на ЧАЭС, обеспечивал миграционный прирост населения в г. Минске, Брестской, Витебской, Гродненской и Минской областях. В Брагинском, Хойникском и Наровлянском районах миграционная убыль населения достигла 37, 42 и 44 % соответственно. В последующие годы миграционная убыль снизилась в Гомельской, однако выросла в Брестской и Гродненской областях при сохранении интенсивного миграционного оттока населения в Могилевской области. За межпереписные периоды 1999–2009 и 2009–2019 гг. определяющая роль в формировании миграционных потоков перешла к дифференциации социально-экономического развития.

Ключевые слова: миграция населения, перепись, Беларусь.

Migration Situation in Regions of Belarus According to the Data of the Adjacent Censuses 1989–2019

The article provides an assessment of the migration situation in Belarus based on the data of the adjacent population censuses of 1989–2019. It was revealed that the regions of attraction for migrants are the city of Minsk and the near-capital districts of the Minsk region. The population of the Minsk region accounted for 75% of the migration factor, and Dzerzhinsky and Smolevichi regions – by 23 %. In 1989–1999 migration outflow of the population from the Gomel and Mogilev regions are revealed. These regions are affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. It caused a migration increase in the population of Minsk, Brest, Vitebsk, Grodno and Minsk regions. The migration loss reached 37, 42 and 44 % of the population in Bragin, Khoyniki and Narovlya districts. In subsequent years, the migration decline decreased in the Gomel region, increased in the Brest and Grodno regions. There was intensive migration outflow of the population in the Mogilev region. During the intercensal periods of 1999–2009 and 2009–2019, the decisive role in the formation of migration flows moved to the differentiation of socio-economic development.

Key words: population migration, census, Belarus.

Введение

Различия в уровне социально-экономического развития стран и регионов находят свое отражение в географической структуре миграционных потоков, которые направлены в первую очередь из менее развитых в более развитые регионы. Миграционные про-

**Исследование выполнено в рамках задания «05.06.2 Миграционный фактор трансформации городского населения Беларуси в условиях глобализации и цифровизации общества» проекта «Прожективное моделирование социально-экономического развития белорусских регионов и миграционных процессов в условиях цифровой трансформации общества» подпрограммы 12.5. «Социология» ГПНИ «Общество и гуманитарная безопасность белорусского государства» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20211332) от 17.05.2021*

цессы оказывают влияние на расселение и динамику численности населения, его половозрастную и образовательную структуру, что обуславливает актуальность геодемографических исследований миграционных процессов.

Миграция населения выступает в качестве механизма разрешения противоречий между размещением населения и экономическими потребностями развития общества. Как правило, основными мотивами миграции выступают трудоустройство и учеба, а в возрастной структуре мигрантов преобладают лица трудоспособного возраста.

Как показывают наши расчеты, около 85 % всех мигрантов как по прибытию, так и по выбытию составляют лица трудоспособного возраста. Исходя из этого общие тенденции миграционных процессов в значительной степени отражают важнейшие тенденции миграционных перемещений трудоспособного населения.

Цель работы – выявить масштабы реальной миграции и определить миграционную ситуацию в административно-территориальных районах Беларуси за межпереписные периоды 1989–2019 гг.

Материалы и методика исследования

Данные вновь проводимых переписей не совпадают с результатами текущего учета численности населения, базирующегося на предыдущих переписях. Поскольку из двух компонентов динамики численности населения – естественного и механического движения – точность учета рождений и смертей в целом стремится к 100 %, то соответствующее расхождение может быть обусловлено неполным учетом миграционных перемещений. Данный методический подход обоснован в ранее проведенных автором исследованиях [1–3]. Так, для официальной статистики характерен неполный учет мигрантов вследствие отсутствия в настоящее время необходимости в получении разрешения органов по гражданству и миграции на выезд за пределы страны, упразднением института прописки и смягчением ответственности за проживание без регистрации, что тем не менее полностью согласуется с положениями Конституции Республики Беларусь о праве граждан на свободное передвижение.

Неполный учет мигрантов обусловлен также отсутствием пограничного контроля на границе с Российской Федерацией. В пользу подхода о неполноте учета миграционных перемещений свидетельствует также тот факт, что данные по прибытиям и выбытиям из Беларуси отличаются от данных статистических органов других стран по выбытиям и прибытиям в Беларусь. Кроме того, более строгий и достоверный учет (фиксация) числа рождений и смертей связан с тем, что помимо законодательно закрепленной обязанности граждан по регистрации соответствующих событий, полноценное вхождение в общество и приобретение гражданских прав и обязанностей предполагает наличие таких важных документов, как свидетельство о рождении и гражданский паспорт, что дает возможность получения соответствующих выплат при рождении детей (пособия по беременности и родам, в связи с рождением ребенка, по уходу за ребенком в возрасте до 3 лет, при одновременном воспитании детей до 3 лет и от 3 до 18 лет, а также женщинам, ставшим на учет до 12-недельного срока беременности). Регистрация смертей связана с открытием права наследования, получением помощи при погребении и похоронах. Таким образом, реальное миграционное сальдо, включающее в т. ч. не учтенные официальной статистикой миграционные перемещения, рассчитывается по формуле 1:

$$МС = ЧН_k - ЧН_0 - Р + У = ЧН_k - ЧН_0 - ЕП, \quad (1)$$

где $ЧН_0$ и $ЧН_k$ – численность населения на начало (критический момент предыдущей либо более ранней переписи) и конец периода (последующая либо более поздняя перепись); ЕП – естественный прирост (убыль) населения; МС – миграционное сальдо; Р – число родившихся за период; У – число умерших за период.

Необходимо учитывать, что переписи населения проводятся в разные даты, а сами межпереписные периоды не равны друг другу, хотя и сопоставимы (таблица 1).

Исходя из этого в формуле 1 абсолютный естественный прирост населения как разность между числом родившихся и умерших должен быть скорректирован на соответствующее число дней, действительно входящих в межпереписные периоды, которые не являются кратными целому числу календарных лет.

Информационную основу проведенного исследования составляют статистические данные о численности населения по результатам переписей 1989, 1999, 2009 и 2019 гг. о ежегодном числе родившихся и умерших за период 1989–2019 гг. на основе данных текущего учета рождений и смертей, осуществляемого посредством записей актов органами, регистрирующими акты гражданского состояния (отделы ЗАГСа районных и городских исполнительных комитетов, местных администраций районов в городах, поселковые и сельские исполнительные и распорядительные органы) на уровне административно-территориальных районов и городов областного подчинения Беларуси [4–6].

Таблица 1 – Переписи населения на территории Беларуси в послевоенный период

Дата проведения переписи населения	Межпереписной период	Продолжительность межпереписного периода	
		дни	годы
15 января 1959	–	–	–
15 января 1970	1959–1970	4 015	11,00
17 января 1979	1970–1979	3 287	9,01
12 января 1989	1979–1989	3 645	9,99
16 февраля 1999	1989–1999	3 685	10,10
14 октября 2009	1999–2009	3 890	10,66
04 октября 2019	2009–2019	3 642	9,98

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с общей географической закономерностью усиления межрегиональной дифференциации и дивергенции по мере снижения уровня пространственной иерархии контрастность в направлениях и масштабах миграционных процессов в разрезе административно-территориальных районов и городов областного подчинения значительно возрастает в сравнении со степенью различий между областными регионами.

Вариация относительной миграционной убыли на уровне областных регионов составила 7 % (от 3 % в Гродненской до 10 % в Гомельской и Могилевской областях) за период 1989–2019 гг. В то же время разброс значений миграционной убыли на уровне административно-территориальных районов превысил 40 % (от 1,4 % в Мозырском районе до 44,0 % в Наровлянском).

Территориальный анализ распределения районов по масштабам миграционной убыли позволяет выделить несколько компактных групп регионов с интенсивным миграционным оттоком населения (рисунок 1).

Как правило, районы с очень высоким миграционным оттоком населения относятся к аграрному функционально-планировочному типу (в соответствии с типологией ГСКТО – Государственной схемы комплексной территориальной организации Республики Беларусь).

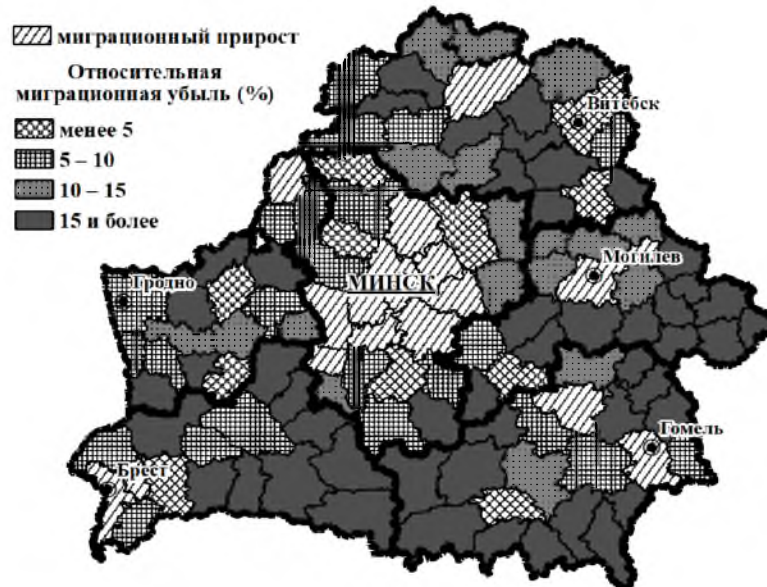


Рисунок 1. – Относительная миграционная убыль (прирост) населения административно-территориальных районов Беларуси за период 1989–2019 гг.

Во-первых, наиболее многочисленная по составу территория Припятского Полесья, включающего районы восточной и южной части Брестской области (Ганцевичский, Ивановский, Столинский и др. районы), западной части Гомельской области (Житковичский, Лельчицкий, Петриковский и др.), Глусский район Могилевской области, а также Любанский район, который является единственным в Минской области с миграционной убылью населения более 15 %. В целом для этой группы районов характерна крупноселенная система расселения сельского населения [7]. Это обуславливает формирование более высокого демографического потенциала данных районов, что на фоне отсутствия крупных источников притяжения рабочей силы определяет достаточно интенсивный исходящий поток мигрантов. Южная часть данного ареала представлена районами, относящимися к категории наиболее пострадавших от последствий аварии на Чернобыльской АЭС, в т. ч. Брагинским, Хойникским и Наровлянским, с миграционной убылью населения 37, 42 и 44 % соответственно. Роль экологического фактора в миграционном перераспределении населения подтверждается и тем фактом, что 10 районов Беларуси с миграционным оттоком более 25 % всего населения за 1990–2010-е гг. входят в названную категорию районов.

Во-вторых, центрально-восточный регион Беларуси, объединяющий районы южной и юго-восточной части Могилевской области (Быховский, Краснопольский, Хотимский и др.) и северо-восточной части Гомельской области (Буда-Кошелевский, Ветковский, Кормянский и Чечерский). Среди данных районов также преобладают не просто районы аграрного функционально-планировочного типа, а наиболее пострадавшие от радиационного загрязнения. Многие сельские населенные пункты этого региона были полностью выселены из-за повышенного радиационного фона (рисунок 2).

Более 1/3 всего населения в результате миграционной убыли потеряли Краснопольский (–43 %), Кормянский (–39 %), Чечерский (–35 %) и Славгородский (–34 %) районы.

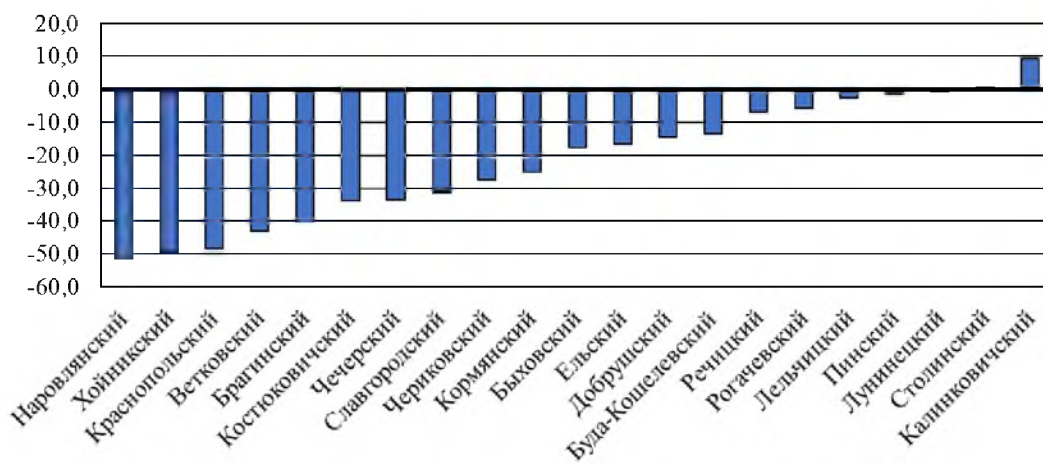


Рисунок 2. – Динамика числа сельских населенных пунктов районов, наиболее пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС, за период 1989–2019 гг., %

В-третьих, компактный ареал районов с большим превышением числа выбывших над числом прибывших сформировался в центральной части Витебской области (Сенненский, Толочинский, Шумилинский и др.). К этой группе районов следует также отнести Дубровенский, Миорский и Шарковщинский районы северной области. В соответствии с функционально-планировочной типологией районы имеют аграрную либо агропромышленную специализацию. Исключением является лишь Чашникский район с ведущей промышленной ролью благодаря размещению на его территории Лукомльской ГРЭС в г. Новолукомле. С 1989 г. миграционный отток населения из района в целом превысил 18 %. Превышение числа выбывших над прибывшими имело место и в самом г. Новолукомле – более 900 человек за 1989–2019 гг., или почти 7 % всего населения. Наибольший миграционный отток населения отмечен в Дубровенском районе (20,7 %).

В-четвертых, отдельные районы Гродненской области (Вороновский, Ивьевский и Щучинский, образующие относительно компактный ареал, а также Зельвенский и Свислочский), а также Пружанский район Брестской области. Обращает на себя внимание то, что в названных пяти районах Гродненской области миграционный отток населения сопоставим с большей частью районов, относящихся к категории наиболее пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС, а также их нахождение в числе 25 районов с наиболее интенсивной убылью населения. В Свислочском районе убыль составила 24,6 %, что выше, чем в 11 районах с наибольшим радиоактивным загрязнением. Из оставшихся четырех районов наименьший отток характерен для Ивьевского района (19,6 %), однако критичность и массовость оттока населения проявляется в том, что он больше, чем в восьми «чернобыльских» районах (из 21).

Экологический фактор отразился не только на административно-территориальных районах, но и на областных центрах, которые в силу большей диверсификации экономической структуры и более комфортных условий проживания являются более устойчивыми системами (таблица 2). За весь анализируемый период в г. Гомеле и г. Могилеве миграционный отток населения составил 4,0 тыс. и 10,8 тыс., а за 1990-е гг. – 33,0 тыс. (6,5 % от численности населения 1989 г.) и 10,5 тыс. (2,9 %) человек соответственно. На 8,8 тыс. человек (на 7,4 %) снизилась численность населения в Пинске, городе областного подчинения и административном центре одноименного района, относящегося

к категории наиболее пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС. Однако миграционный отток в городе был зафиксирован в межпереписном периоде 1999–2009 гг. с интенсификацией убыли в последнем межпереписном периоде 2009–2019 гг.

Таблица 2. – Динамика миграционного прироста (убыли) населения городов областного подчинения Беларуси за межпереписные периоды 1989–2019 гг., тыс. человек

Город	Межпереписной период			
	1989–1999 гг.	1999–2009 гг.	2009–2019 гг.	1989–2019 гг.
Брест	12,9	15,8	14,0	42,7
Барановичи	3,0	2,5	5,2	10,7
Пинск	2,8	-2,9	-8,6	-8,8
Витебск	-9,8	16,0	11,8	18,0
Новополоцк	8,9	0,1	-4,4	4,5
Гомель	-33,0	13,4	15,6	-4,0
Гродно	15,3	18,1	11,8	45,2
Жодино	1,3	1,6	0,7	3,5
Могилев	-10,5	4,1	-4,5	-10,8
Бобруйск	-5,6	-1,7	-2,1	-9,5

Устойчивая миграционная убыль населения фиксировалась в г. Бобруйске. Суммарный миграционный отток населения за 1989–2019 гг. достиг 9,5 тыс. человек, что составляет 4,3 % от численности населения 1989 г. Наибольший отток населения отмечался в 1989–1999 гг., в т. ч. и из-за оттока еврейского населения. Так, по переписи 1959 г. в городе проживало 15,6 тыс., в 1989 г. – 10,5 тыс., а по данным переписи 2019 г. – 0,6 тыс. евреев. В первые послевоенные десятилетия в городе проживало около 10 % еврейского населения Беларуси.

Во всех остальных городах областного подчинения в целом за период наблюдался миграционный прирост. Наибольшее миграционное сальдо отмечено в Гродно и Бресте (45,2 и 42,7 тыс. человек соответственно) на уровне 17 % по отношению к численности населения 1989 г. в обоих случаях. Ключевым источником роста населения выступала внутриобластная миграция. В некоторых городах областного подчинения в отдельные межпереписные периоды фиксировался отток населения: в Витебске (-9,8 тыс. человек за 1989–1999 гг.) и Новополоцке (-4,4 тыс. человек за 2009–2019 гг.).

За период 1989–2019 гг. *миграционный прирост населения отмечен в 19 районах*. Почти половина из них территориально тяготеет к г. Минску, образуя цельный регион притяжения населения из других районов страны. Безусловными конкурентными преимуществами в экономико-географическом положении обладает Минский район. За счет миграционного фактора численность населения района возросла на 3/4, что в абсолютном исчислении составляет почти 104 тыс. человек (рисунок 3).

Из «минской» группы районов с положительным миграционным сальдо выделяются также Дзержинский и Смолевичский, примыкающие к Минскому району и фактически к г. Минску соответственно с юго-запада и северо-востока по оси трансъевропейского транспортного коридора II. В этом проявляется воздействие фактора транспортной доступности в сочетании с государственной политикой по развитию городов-спутников (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29 июня 2010 г. № 976 «О Государственной программе строительства крупных жилых районов для жителей г. Минска в городах-спутниках и выноса (переноса) из столицы в населенные пункты республики некоторых производственных объектов», Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2014 г. № 214 «О развитии городов-спутников»).

В качестве городов-спутников Минска были определены 6 городских поселений: Дзержинск, Фаниполь (промышленные); Смолевичи, Руденск (агропромышленные); Заславль, Логойск (туристско-рекреационные). Относительный миграционный прирост превысил в Дзержинском и Смолевичском районах 23 %, а абсолютное превышение числа прибывших над выбывшими составило 13,9 и 11,1 тыс. человек соответственно. На фоне общего достаточно высокого роста людности райцентров г. Дзержинска (25 %) и г. Смолевичи (44 %) заметно выделяется г. Фаниполь Дзержинского района, численность жителей которого за 1989–2019 гг. увеличилась более чем в 2 раза, достигнув 17,5 тыс. человек. В «минскую» группу районов с миграционным приростом населения, кроме того, входят Логойский (9,4 %, 4,1 тыс. человек), Узденский (4,9 %, 1,4 тыс. человек), Пуховичский (4,8 %, 3,7 тыс. человек), Несвижский (3,9 %, 1,9 тыс. человек), Червенский (2,2 %, 0,9 тыс. человек) и Столбцовский (1,9 %, 0,9 тыс. человек).

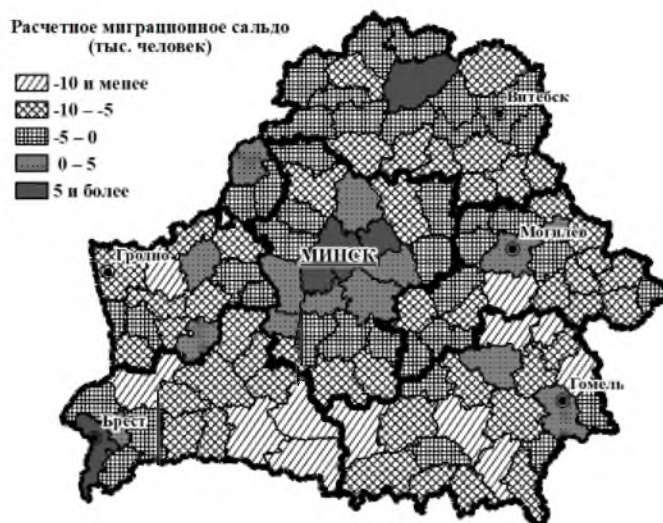


Рисунок 3. – Расчетное миграционное сальдо за межпереписной период 1989–2019 гг.

Несмотря на административно-территориальные преобразования, как правило связанные с включением в состав городов областного подчинения близлежащих населенных пунктов одноименных административно-территориальных районов, миграционный фактор определил увеличение численности населения Брестского района на 13,9 %. Способствовало этому частное домостроительство в пригородной зоне г. Бреста и строительство многоквартирных домов для нуждающихся в улучшении жилищных условий (деревни Тельмы, Черни, Б. Мотыкалы, Чернавчицы, Остромечево и др.). Положительное миграционное сальдо в районе сложилось на уровне 5,9 тыс. человек. Схожие факторы определили миграционный прирост населения Жабинковского района, имеющего крайне выгодное транспортно-географическое положение благодаря нахождению в пределах полимагистрального транспортного коридора с близким расположением к областному центру и производственным площадкам СЭЗ «Брест». Абсолютный миграционный прирост в районе составил 2,0 тыс. человек, или 7,9 % к численности населения 1989 г. В целом фактор близости областного центра как сосредоточения социально-экономической активности следует отметить и в отношении Гомельского (3,5 %, 2,8 тыс. человек) и Могилевского (1,5 %, 0,9 тыс. человек) районов.

На 2,0 тыс. человек прирост Дрибинский район Могилевской области, воссозданный в конце 1989 г. специально для переселения жителей территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС (Указ Президиума Верховного Совета Белорусской ССР

от 29 декабря 1989 г. №3043-ХІ «Об образовании Дрибинского района Могилевской области»). Район был образован путем включения в его состав пяти сельсоветов Горецкого и одного сельсовета Шкловского района. В относительном выражении миграционный прирост составил 15 %. На момент образования района его центр Дрибин по причине малой численности населения имел статус сельского населенного пункта, впоследствии в 1997 г. став поселком городского типа с числом жителей 3,1 тыс. человек в 2019 г.

К районам, в которых за период 1989–2019 гг. отмечался миграционный прирост населения, относятся также Полоцкий, Жлобинский и Островецкий (Витебская, (Гомельская и Гродненская области). В первых двух из них важную роль играет наличие успешно функционирующих крупных промышленных предприятий. В первую очередь речь идет о Белорусском металлургическом заводе, мясокомбинате, фабрике искусственного меха (БЕЛФА) в г. Жлобине; заводе стекловолокна (Полоцк-Стекловолокно) в г. Полоцке. Для Полоцкого района дополнительным положительным фактором выступает наличие учебно-лабораторных корпусов Полоцкого государственного университета (юридический адрес и большая часть корпусов находятся в Полоцке, Новополоцке) и п. Междуречье, а также близкое расположение Новополоцка к крупным нефтеперерабатывающим (Нафтан) и химическим (Полимир) заводами. В Островецком районе положительное миграционное сальдо обусловлено строительством атомной электростанции (Белорусская АЭС) и созданием в г. Островце микрорайона для работников станции – «атомгорода». В 2012 г. районный центр Островец из городского поселка был преобразован в город районного подчинения. Практически равная численность прибывших и выбывших мигрантов отмечена в Слонимском и Лидском районах Гродненской области.

Как свидетельствуют данные таблицы 3, за период 1989–1999 гг. миграционный прирост был зафиксирован в 56 районах, распределение которых по областям отражает географическую структуру миграционных потоков. Планомерное переселение жителей пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС регионов сопровождалось закономерным отрицательным миграционным сальдо в большей части районов Гомельской, Могилевской и в меньшей степени Брестской областей. Одновременно с этим наблюдалось превышение числа прибывших над выбывшими в большей части районов Витебской, Гродненской и Минской областей. Вместе с тем и в этих областных регионах в 21 районе наблюдался миграционный отток населения.

Таблица 3. – Распределение районов по направленности миграционных процессов

Область	Межпереписные периоды								Всего районов
	1989–1999 гг.		1999–2009 гг.		2009–2019 гг.		1989–2019 гг.		
	+	–	+	–	+	–	+	–	
Брестская	7	9	1	15	2	14	2	14	16
Витебская	13	8	2	19	1	20	1	20	21
Гомельская	3	18	2	19	2	19	2	19	21
Гродненская	10	7	0	17	2	15	3	14	17
Минская	16	6	3	19	11	11	9	13	22
Могилевская	7	14	1	20	2	19	2	19	21
Итого	56	62	9	109	20	98	19	99	118

Примечание – «+» – миграционный прирост, «–» – миграционная убыль.

К 2000 гг. полностью было завершено переселение жителей, проживавших на территориях с высоким радиационным загрязнением. Как следствие, существенно сократился миграционный отток населения из «чернобыльских» районов. Вместе с этим снизилось значение данных районов как источника пополнения демографического потенци-

ала других районов страны. Кардинально изменилась географическая структура миграционных процессов. Число районов с положительным миграционным сальдо снизилось с 56 до 9, а с отрицательным миграционным сальдо возросло с 62 до 109. Таким образом, основной тенденцией за межпереписной период 1999–2009 гг. является территориальное расширение миграционного оттока населения, проявившееся в увеличении числа районов с миграционной убылью (рисунок 4).

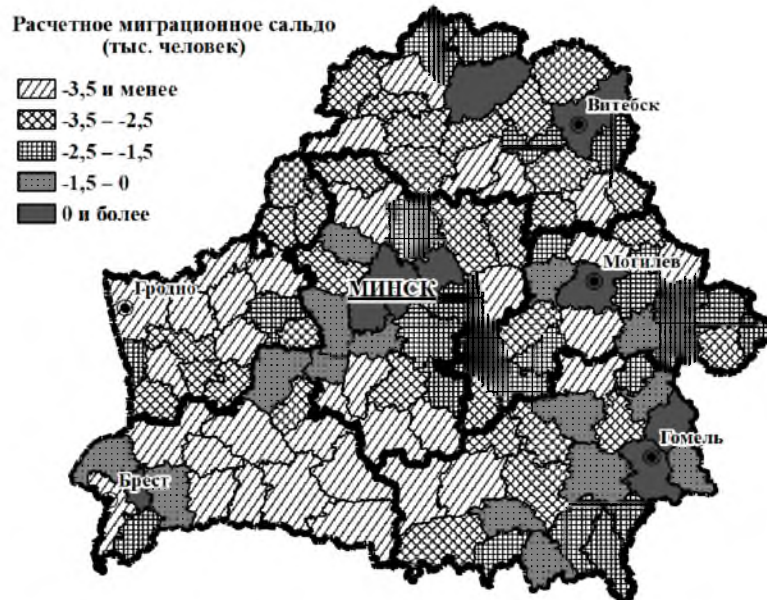


Рисунок 4. – Расчетное миграционное сальдо за межпереписной период 1999–2009 гг.

В межпереписной период 2009–2019 гг. региональная миграционная ситуация также претерпела определенные изменения: во-первых, увеличилось число районов с положительным миграционным сальдо с 9 до 20, а во-вторых, такое территориальное расширение произошло в первую очередь за счет районов Минской области (рисунок 5).

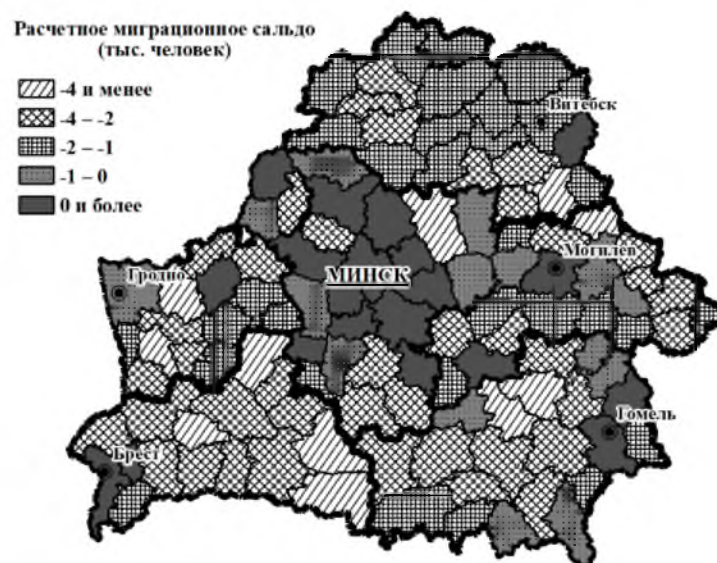


Рисунок 5. – Расчетное миграционное сальдо за межпереписной период 2009–2019 гг.

К Минскому, Дзержинскому и Смолевичскому районам добавилось еще восемь районов, в которых в совокупности благодаря превышению числа прибывших над выбывшими был обеспечен миграционный прирост в 108,2 тыс. человек. Заметно выросло значение указанных трех районов «минской» группы, в которых прирост вырос многократно и в абсолютном выражении составил 80,4, 7,9 и 8,9 тыс. человек соответственно. За счет пригородных сельских населенных пунктов обеспечивался миграционный прирост в Брестском, Гомельском и Могилевском районах (5,8, 2,8 и 1,6 тыс. человек соответственно) Сохранился, хоть и несколько ослаб, миграционный приток в Ветковском и Жабинковском районах (0,3 и 0,1 тыс. человек соответственно). В группу районов с миграционным приростом вошли также Лидский, Бобруйский и Лиозненский (1,6, 0,9 и 0,1 тыс. человек). Благодаря строительству Белорусской АЭС на 4,5 тыс. человек увеличилась численность населения Островецкого района.

В 2010 гг. сменились районы, генерирующие исходящий миграционный поток. Если в предыдущий межпереписной период первая десятка районов по превышению числа выбывших над прибывшими была представлена исключительно аграрными районами, то за 2009–2019 гг. таких районов было только два – Столинский и Щучинский (–7,9 и –6,2 тыс. человек). Остальные районы относились к многофункциональному (Барановичский, Оршанский – –8,2, –7,3 тыс. человек соответственно), промышленному (Борисовский, Жлобинский, Светлогорский – –8,1, –6,0, –5,4 тыс. человек), промышленно-аграрному (Лунинецкий, Волковысский – –6,1, –5,1 тыс. человек) и научному (Горецкий – –5,8 тыс. человек) функционально-планировочным типам. В целом эти районы в результате миграционного обмена потеряли 66,2 тыс. человек.

Из 25 районов с наибольшей абсолютной миграционной убылью лишь четыре относятся к категории наиболее пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС. Это, как уже отмечалось, Лунинецкий и Столинский районы, а также Рогачевский и Калинковичский (4,0 и 3,7 тыс. человек). Миграционная убыль в 3 тыс. человек и более была отмечена в 32 районах Беларуси. В их числе и Солигорский район (3,9 тыс. человек), относящийся к функционально-планировочному типу с ведущей промышленной функцией. Вследствие значительного исчерпания демографического потенциала сильно уменьшился отток населения из районов Витебской области. В 13 ее районах миграционная убыль составила 1–2 тыс. человек.

Заключение

Регионами притяжения мигрантов выступают г. Минск и пристоличные районы Минской области. За счет миграционного притока за 1989–2019 гг. на 75 % возросла численность населения Минского района, на 23 % – Дзержинского и Смолевичского. Наибольший отток населения характерен для районов, относящихся к категории наиболее пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС. В Брагинском, Хойникском и Наровлянском районах миграционная убыль населения составила 37, 42 и 44 % соответственно. В 1989–1999 гг. миграционный отток населения из районов Гомельской и Могилевской областей обеспечивал миграционный прирост населения других регионов страны. В последующие годы миграционная убыль снизилась в Гомельской, однако усилилась в Брестской и Гродненской областях при сохранении интенсивного миграционного оттока населения в Могилевской области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сидорович, А. А. Региональная оценка миграционной ситуации в Беларуси на основе данных смежных переписей / А. А. Сидорович // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2017. – № 1. – С. 102–111.

2. Сидорович, А. А. Региональные тенденции механического движения населения Беларуси / А. А. Сидорович // *Вестн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі.* – 2014. – № 2. – С. 123–132.

3. Сидорович, А. А. Роль внешней миграции в формировании демографического и трудоворесурсного потенциала Беларуси / А. А. Сидорович // *Миграционные процессы: тренды, вызовы, перспективы : сб. материалов Междунар. науч.-прак. конф., Казань, 14–15 марта 2014 г. ; под ред. Н. Г. Багаутдиновой, Е. В. Фахрутдиновой.* – Казань : Отечество, 2014. – С. 299–303.

4. 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: 11.12.2020.

5. 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.

6. 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.

7. Корженевич, С. В. Географические закономерности трансформации населения Белорусского Полесья : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.24 / С. В. Корженевич ; Брест. гос. ун-т. им. А. С. Пушкина. – Брест, 2011. – 183 л.

REFERENCES

1. Sidorovich, A. A. Riegiional'naja ocenka migracionnoj situacii v Bielarusi na osnovie dannyh smiezhnykh pieriepisiej / A. A. Sidorovich // *Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli.* – 2017. – № 1. – S. 102–111.

2. Sidorovich, A. A. Riegiional'nyje tendencii miekhanichieskogo dvizhenija nasielienija Bielarusi / A. A. Sidorovich // *Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli.* – 2014. – № 2. – S. 123–132.

3. Sidorovich, A. A. Rol' vneshniej migracii v formirovanii diemografichieskogo i trudoriesursnogo potenciala Bielarusi / A. A. Sidorovich // *Migracionnyje processy: trendy, vyzovy, pierspiektivy : sb. materialov Miezhdunar. nauch.-prak. konf., Kazan', 14–15 marta 2014 g. ; pod ried. N. G. Bagautdinovoj, Ye. V. Fakhrutdinovoj.* – Kazan' : Otiehiestvo, 2014. – S. 299–303.

4. Interaktivnaja informacionno-analitichieskaja sistiema rasprostranienija oficial'noj statistichieskoj informacii [Eliiektronnyj riesurs] / *Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus'.* – Riezhim dostupa: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Search>. – Data dostupa: 11.12.2020.

5. Obshchaja chisliennost' nasielienija, chisliennost' nasielienija po vozrastu i polu, sostojaniju v brake, urovniu obrazovanija, nacional'nostiam, jazyku, istochnikam sriedstv k su-shchiestvovaniju po Riespublikie Belarus', 2019 : *stat. biul. / Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus'.* – Minsk : *Nac. stat. kom. Riesp. Bielarus',* 2020. – 55 s.

6. 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 Belarus': jego chisliennost' i sostav,* 2010. – 414 s.

7. Korzhenievich, S. V. *Gieografichieskije zakonomiernosti transformacii nasielienija Bielorussskogo Polies'ja : dis. ... kand. gieogr. nauk : 25.00.24 / S. V. Korzhenievich ; Briest. gos. un-t im. A. S. Pushkina.* – Briest, 2011. – 183 l.

УДК 656.02

Денис Анатольевич Трофимчук*канд. геогр. наук, доц. каф. географии и природопользования
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина***Denis Trofimchuk***PhD in Geographical Sciences,
Associate Professor of the Department of Geography and Nature Management
of the Brest State A. S. Pushkin University
e-mail: denistr7@mail.ru*

ОЦЕНКА УРОВНЯ РАЗВИТИЯ АВТОБУСНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В ГОРОДЕ БРЕСТЕ

Представлены результаты оценки уровня развития автобусного пассажирского транспорта в планировочных районах г. Бреста. Оценка выполнена на основе базы данных, характеризующих городской автобусный транспорт, остановки и автобусные маршруты. Установлено, что ключевыми факторами, обеспечивающими высокий уровень развития пассажирского автобусного транспорта, являются местоположение района и преобладающий в нем тип жилой застройки. Все районы с многоэтажным, а также районы со смешанным типом жилой застройки, но расположенные ближе к центру города характеризуются лучшим по сравнению с другими районами уровнем развития автобусного транспорта. Результаты исследования могут быть использованы в процессе оптимизации автобусного сообщения в г. Бресте.

Ключевые слова: *общественный транспорт, городская среда, автобусные маршруты, остановки общественного транспорта, геоинформационные технологии, базы данных.*

Assessment of the Level Development Bus Passenger Transport in the City of Brest

The results of assessing the level of development of bus passenger transport in the planning areas of Brest are presented. The assessment was made on the basis of a database characterizing urban bus transport in terms of stops and bus routes serving them. It has been established that the key factors ensuring a high level of development of passenger bus transport are the location of the area and the type of residential development prevailing in it. All areas with high-rise buildings, as well as areas with a mixed type of residential development, but located closer to the city center, are characterized by the best level of development of bus transport in comparison with other areas. The resulting data can be used in the process of optimizing the bus service in Brest.

Key words: *public transport, urban environment, bus routes, public transport stops, geoinformation technologies, databases.*

Введение

В современном мире обеспечение сбалансированной транспортной системы является необходимым условием экономического развития любой территории от отдельного города, до страны в целом. Транспорт представляет собой один из ключевых секторов экономики, а также является важнейшей составной частью производственной и социальной инфраструктуры.

Особенностью планировки и функционального зонирования большинства современных городов является концентрация различных функций в определенных районах, что заставляет горожан ежедневно перемещаться из районов своего проживания в районы приложения труда и концентрации различных общественных функций. Попытки создать городские районы, в которых человек может одновременно жить и работать уже существуют, однако массовое появление таких районов видится достаточно отдаленной перспективой. Учитывая тенденцию роста доли городского населения мира и площадей, занимаемых городами, все более актуальной будет задача удовлетворения всевозрастающей потребности в мобильности населения в городах.

Удовлетворение этой потребности за счет личного автотранспорта имеет ряд ограничений. Во-первых, не каждый городской житель имеет возможность приобретения личного автомобиля. Во-вторых, даже очень активное строительство новых и расширение старых дорог в городе не сможет обеспечить потребность всех автомобилистов и в конечном итоге приведет к автомобильным пробкам (парадокс Пигу – Найта – Доунса) [1]. Комфортное перемещение по городу пешком или на велосипеде возможно только на относительно короткие расстояния, в связи с чем основным средством перемещения по территории города для большинства его жителей выступает общественный транспорт. Таким образом, уровень развития общественного транспорта имеет очень важное значение в формировании качества городской среды и комфорта жизни горожан.

Материалы и методика исследования

Информационной основой данного исследования послужило расписание движения и схемы автобусных маршрутов, представленные на сайте Коммунального унитарного предприятия «Брестский общественный транспорт» [2]. Источником данных об автобусных остановках стал некоммерческий веб-картографический проект OpenStreetMap, откуда в формате shape-файла были получены местоположения и названия остановочных пунктов. Ввиду того что в большинстве случаев одна остановка общественного транспорта на местности представлена двумя или более объектами с одинаковым названием (для прямого и обратного направления движения), потребовалось провести генерализацию данных. Для остановок с одинаковым названием была определена точка, являющаяся для данных объектов геометрическим центром.

Территориальными единицами исследования выступили планировочные районы г. Бреста. В качестве показателей, отражающих уровень развития автобусного транспорта, были выбраны количество и плотность остановок, количество и плотность обслуживающих их автобусных маршрутов [3], а также среднее количество маршрутов и рейсов по остановкам в районе. В целом количественные показатели отражают вариативность предложения услуг автобусного перемещения, а плотностные – степень насыщенности городского пространства автобусным транспортом. Итоговый уровень развития автобусного транспорта определялся методом рангов по указанным выше показателям.

Результаты исследования и их обсуждение

Брест – крупный город Беларуси с численностью населения на 1 января 2022 г. 340,723 человека. Это второй город в Республике Беларусь после г. Минска по занимаемой площади – 146,1 км². В административном отношении Брест делится на два района – Московский (69 % населения, 54 % территории) и Ленинский (31 % населения, 46 % территории). В планировочном отношении город состоит из 17 планировочных районов (Березовка, Волынка – Гершоны, Восток, Вулька, Граевка, Дубровка, Задворцы, Катин Бор, Киевка, Ковалево, Котельня-Боярская, Красный Двор, Плоска, Речица, Тельмы, Центр, Ямно – Вычулки).

Средняя площадь планировочного района составляет 8,6 км². Самыми большими по площади планировочными районами города являются Катин Бор (10,2 % от общей площади города) и Волынка – Гершоны (10 %). Самыми маленьким – Березовка (4,1 %), Красный Двор (3,6 %) и Тельмы (2 %). Ввиду особенностей исторического развития планировочные районы отличаются между собой не только размерами, но и функциональной структурой, в первую очередь соотношением типов жилой застройки, что определяет численность населения в каждом районе. Преимущественно многоэтажный тип жилой застройки характерен для районов Центр, Восток, Вулька, Ковалево, смешанный – для районов Киевка, Речица, Дубровка, Граевка. Усадебный тип преобладает в районах

Катин Бор, Плеска, Березовка, Задворцы, Ямно – Вычулки, Волынка – Гершоны, Котельня-Боярская. В двух городских районах (Тельмы и Красный двор), находящихся на востоке города, отсутствует жилая зона, т. к. они относительно недавно вошли в состав города и в настоящее время выполняют преимущественно ландшафтно-рекреационные функции.

Общественный транспорт в г. Бресте представлен автобусами, троллейбусами и маршрутными такси. Услуги автобусных и троллейбусных перевозок предоставляет Коммунальное унитарное предприятие «Брестский общественный транспорт», а услуги маршрутных такси – частные компании. Движение общественного транспорта в Бресте осуществляется по 57 автобусным, 18 маршрутных такси и 9 троллейбусным маршрутам. Таким образом, именно автобусный транспорт является основным видом общественного транспорта в г. Бресте.

Размещение автобусных остановок по планировочным районам города выглядит следующим образом (рисунок 1).

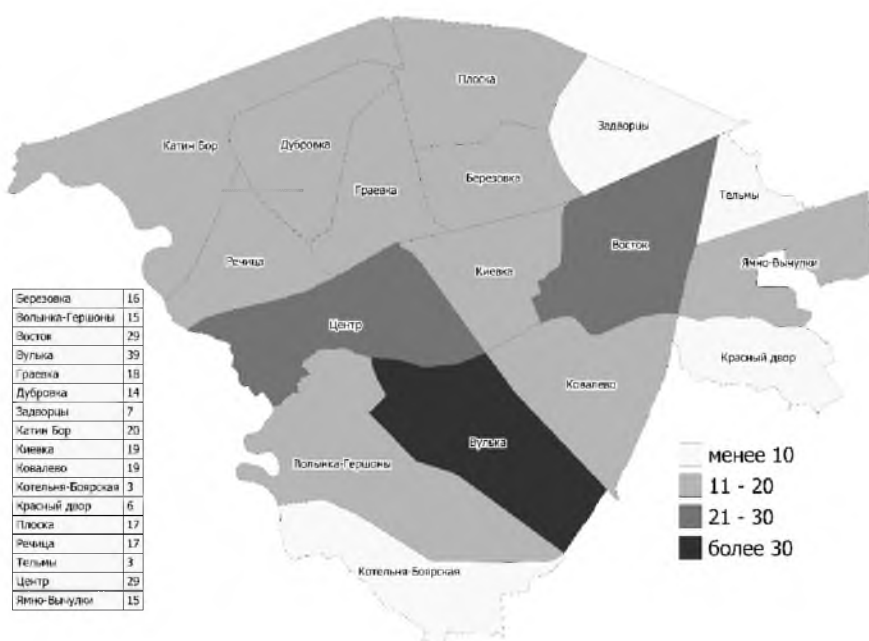


Рисунок 1. – Количество автобусных остановок в планировочных районах г. Бреста

Наибольшим количеством остановок (39) характеризуется район Вулька. Большое количество остановок в данном районе связано с тем, что здесь в последние 15 лет были построены несколько крупных микрорайонов с многоэтажными жилыми домами, возведение которых предполагает новое дорожное строительство и создание остановочных пунктов общественного транспорта с учетом перспективной численности населения. В итоге здесь были открыты 17 новых остановок общественного транспорта.

На втором месте по количеству автобусных остановок находятся районы Центр и Восток, в которых расположено по 29 остановок. В большинстве районов г. Бреста количество автобусных остановок находится в пределах от 11 до 20. Наименьшее количество остановок (менее 10) отмечено в малых периферийных районах – Задворцы, Тельмы, Красный Двор, Котельня-Боярская.

Ситуация с плотностью автобусных остановок в планировочных районах г. Бреста представлена на рисунке 2. Наибольшей плотностью остановок (более 3 на км²) отличается район Вулька. Районы с плотностью автобусных остановок от 2,01 до 3 на км²

сконцентрованы в центральной части города и пересекают ее с запада на восток (Центр, Речица, Граевка, Киевка, Березовка, Восток, Ямно – Вычулки). Большинство периферийных районов города (Катин Бор, Дубровка, Плоска, Тельмы, Красный Двор, Ковалево, Волынка – Гершоны) характеризуются плотностью автобусных остановок в пределах от 1,01 до 2 на км². Плотность менее 1 на км² выявлена в районах Задворцы и Котельня-Боярская.

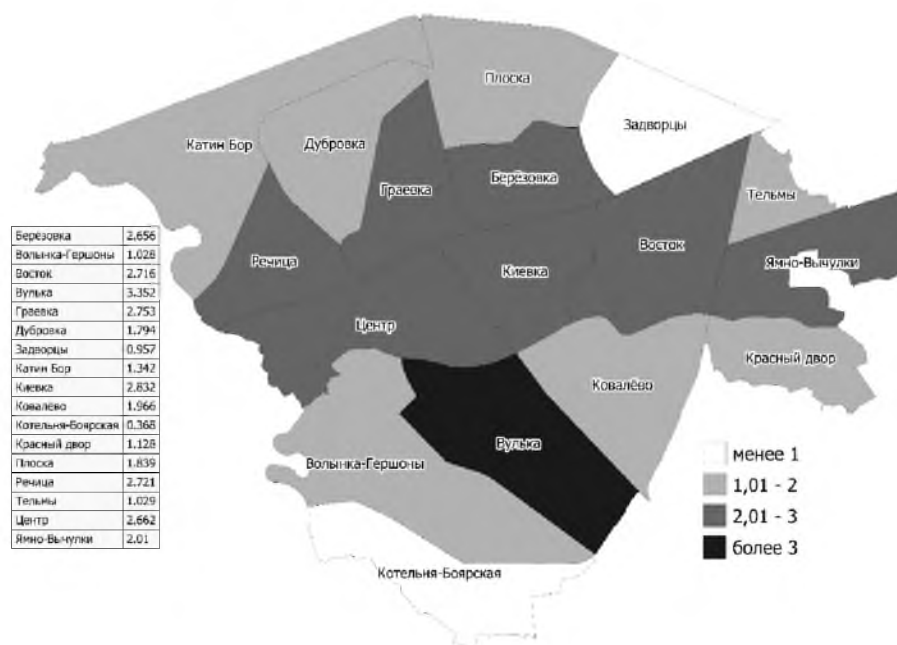


Рисунок 2. – Плотность автобусных остановок в планировочных районах г. Бреста, ед./км²

В целом размещение автобусных остановок в г. Бресте выглядит логичным и закономерным. Районы с наибольшей численностью населения (Центр, Восток, Вулька) хорошо обеспечены автобусными остановками как по количеству, так и по плотности. Районом с относительно высокой численностью населения, которое в перспективе еще увеличится из-за жилищного строительства, и невысокими показателями обеспеченности автобусными остановками является Ковалево. Периферийные районы с преимущественно усадебным типом жилой застройки обеспечены автобусными остановками хуже.

Анализ маршрутной сети автобусов показал, что наибольшее количество маршрутов проходит по территории районов Центр (44) и Киевка (33). Такая концентрация автобусных маршрутов обусловлена рядом причин. Во-первых, прохождением по территории указанных районов основных транзитных коридоров, по которым осуществляется транспортное сообщение с остальными районами города как с севера на юг, так и с запада на восток. Во-вторых, район Центр выполняет роль общегородского центра, где сконцентрировано большинство торговых, развлекательных и общественных функций, что делает транспортную доступность данного района чрезвычайно важной для большинства горожан. В-третьих, в указанных районах расположен ряд промышленных предприятий со значительным числом занятых. Более 20 автобусных маршрутов проходят по территории района Граевка, что также объясняется ролью коридора, связывающего северо-западные и северо-восточные районы с остальной частью города.

В 7 районах (Плоска, Речица, Катин Бор, Березовка, Ковалево, Вулька, Восток) функционируют от 11 до 20 маршрутов. Относительное снижение количества маршрутов в указанных районах объясняется тем, что это основные «спальные» районы города,

в связи с чем здесь достаточно нескольких автобусных маршрутов, обеспечивающих связь с общегородским центром и местами работы.

В оставшихся районах города функционирует менее 10 маршрутов. Дубровка и Волынка – Гершоны (от 6 до 10), Красный Двор, Котельня-Боярская, Ямно – Вычулки, Тельмы и Задворцы (до 5). Указанные районы имеют преимущественно усадебный тип жилой застройки, что обуславливает небольшую численность жителей и, как следствие, относительно невысокую потребность в общественном транспорте (рисунок 3).

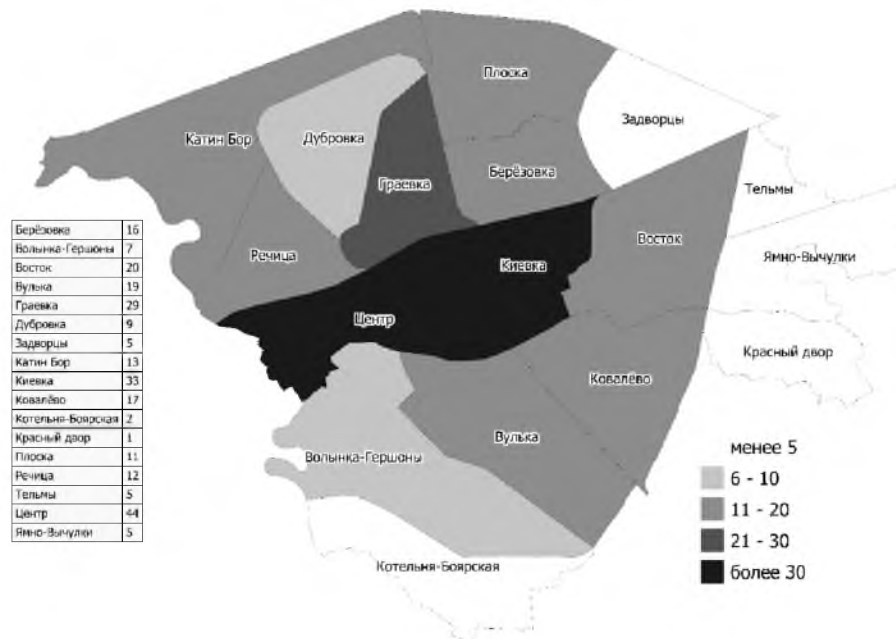


Рисунок 3. – Количество автобусных маршрутов в планировочных районах г. Бреста

Анализ плотности автобусных маршрутов (рисунок 4) показывает, что, как и в случае с количеством автобусных маршрутов, наиболее высокие значения данного показателя отмечены в районах Киевка ($12,93 \text{ км/км}^2$) и Центр ($11,73 \text{ км/км}^2$). Вторую группу с плотностью от $5,01$ до 10 км/км^2 образуют пять районов, примыкающих к предыдущим с севера, востока и юго-запада (Граевка, Березовка, Восток, Ковалево, Вулька). Третья группа с плотностью от $2,01$ до 5 км/км^2 представлена четырьмя районами северной и северо-западной частей города (Плоска, Дубровка, Катин Бор, Речица). Районы, расположенные на восточной окраине города (Задворцы, Тельмы, Ямно – Вычулки), а также район Волынка – Гершоны характеризуются плотностью автобусных маршрутов от $1,01$ до 2 км/км^2 . Наименьшая плотность (менее 1 км/км^2) характерна для районов Красный Двор и Котельня-Боярская.

Анализ маршрутной сети по количеству и плотности маршрутов позволил установить, что районы Центр, Киевка и Граевка наилучшим образом обеспечены автобусными маршрутами. Район Центр, как главный район притяжения жителей, выступает узловой точкой существующей маршрутной сети автобусов в г. Бресте: по его территории проходит 44 из 57 городских автобусных маршрутов. Ключевым фактором высокой обеспеченности автобусными маршрутами в районах Киевка и Граевка является их транзитное положение, обеспечивающее связи между районами.

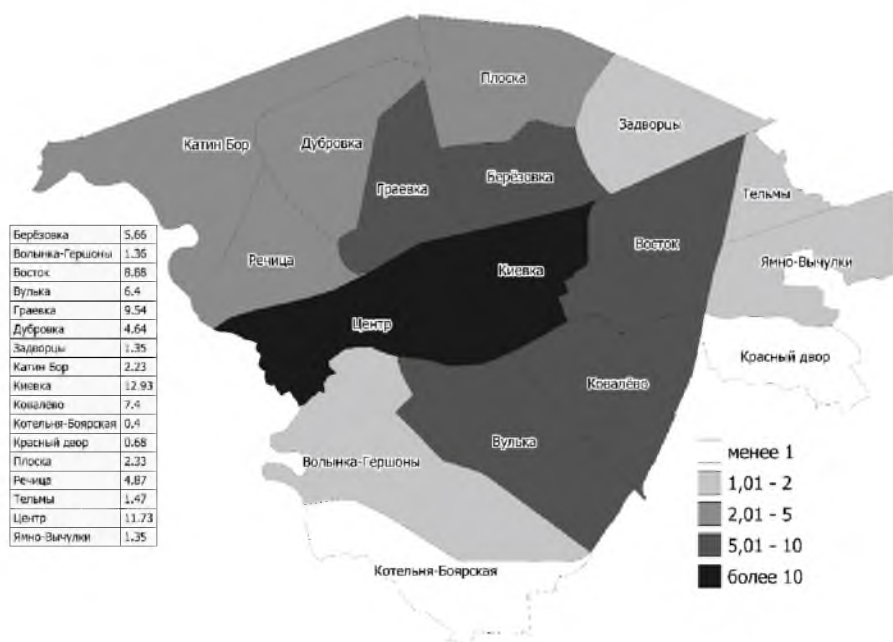


Рисунок 4. – Плотность автобусных маршрутов в планировочных районах г. Бреста, км/км²

Обеспеченность автобусными маршрутами основных жилых и промышленных районов города находится на среднем уровне. Наиболее низкая обеспеченность у периферийных районов.

В ходе исследования для всех автобусных остановок определено количество обслуживающих их маршрутов в будний день (рисунок 5). Данная информация позволила как определить остановки с наибольшим количеством маршрутов, так и рассчитать структуру автобусных остановок по количеству маршрутов и среднее количество автобусных маршрутов по остановкам для каждого района (таблица 1).

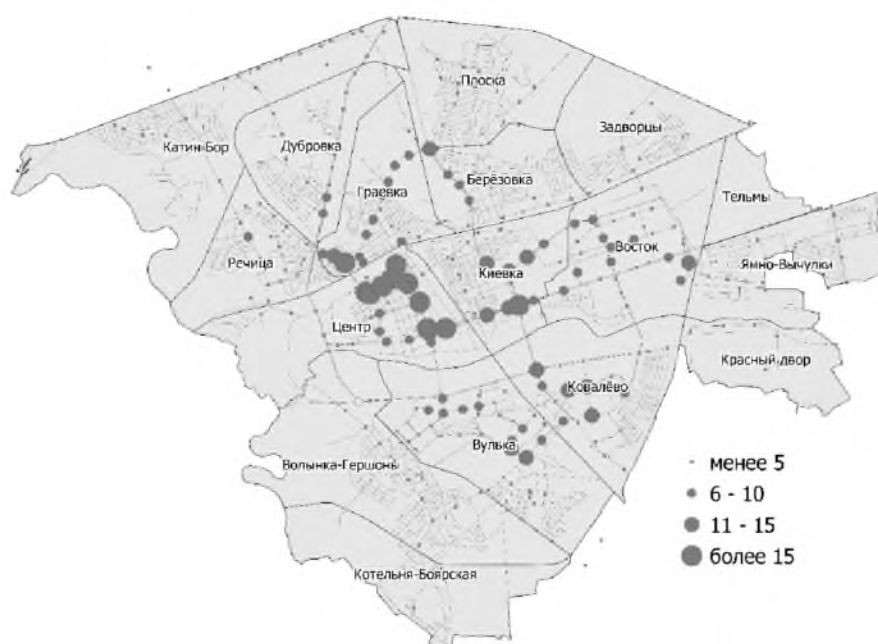


Рисунок 5. – Количество автобусных маршрутов по остановкам общественного транспорта в будни

Устаноўлена, што найбольшае колькасць аўтобусных маршрутаў (32) абслужывае астановку «Завод Газоапарат», размяшчэнную ў раёне Цэнтр. У цэлым 9 з 11 астановак з больш чым 15 аўтобуснымі маршрутамі размяшчаны ў даным раёне. Для астатніх раёнаў горада не характэрна такая сітуацыя, замест гэтага ў іх можна выдзяліць некалькі узловых астановак з буйным колькасцем аўтобусных маршрутаў. Напрыклад, раён Восток – астанова «Стафеева» (11 маршрутаў), Кіевка – «Беларусбанк» (16), «Зеленая» і «ЦМТ» (15), Вулька – «Мікрораён Южны» (15), Граевка – «Мостовая» (17), Брэстскіх Дывізіяў (15), Ковалева – «Рынок Лагуна» (15).

У цэлым можна адзначыць, што ў большасці раёнаў г. Брэста прэобладаюць астановкі, абслужываемыя 5 і менш аўтобуснымі маршрутамі. Ісклучэнне складаюць раёны Граевка, дзе доля такіх астановак 33 %, і Цэнтр – 48 %. Адносна сярэдняга колькасця аўтобусных маршрутаў па астановак раёна лідэрамі з'яўляюцца раёны Цэнтр (9,2 маршрута на астановку) і Граевка (7), аўтсайдэрамі – Красны двор (1) і Ямно – Вычулки (1,87).

Табліца 1. – Характэрыстыка астановак планіровачных раёнаў г. Брэста па колькасцю аўтобусных маршрутаў у будні дзень

Планіровачны раён	Структура астановак па колькасцю маршрутаў, %				Сярэдняе колькасць маршрутаў па астановак
	<5	6–10	11–15	>15	
Березовка	75	19	6	–	4,06
Волынка-Гершоны	100	–	–	–	2,2
Восток	62	34	4	–	5,7
Вулька	74	21	5	–	4,23
Граевка	33	55	6	6	7
Дубровка	86	14	–	–	5,2
Задворцы	100	–	–	–	3
Катин Бор	100	–	–	–	2,8
Кіевка	58	11	26	5	6,58
Ковалева	63	16	21	–	5,58
Котельня-Боярская	100	–	–	–	2
Красны Двор	100	–	–	–	1
Плоска	94	–	6	–	2,8
Речица	94	6	–	–	3,7
Тельмы	100	–	–	–	2,3
Цэнтр	48	17	4	31	9,2
Ямно-Вычулки	100	–	–	–	1,87

Таксама ў даным даследаванні было прааналізавана колькасць рейсаў, выконваемых аўтобусаў па кожнай астановцы ў будні дзень (рысунк 6). Устаноўлена, што ў 11 раёнах горада па 50 і больш працэнтам астановак выконваецца менш 50 рейсаў аўтобусаў (табліца 2). Кром таго, толькі ў 5 раёнах (Восток, Вулька, Граевка, Кіевка, Цэнтр) ёсць астановкі з больш чым 200 рейсамі ў дзень, і ўсе 6 аўтобусных астановак, па якіх выконваецца больш 300 рейсаў ў дзень, размяшчаны ў раёне Цэнтр. Па сярэдняму колькасцю рейсаў, выконваемых аўтобусаў па астановак раёнаў, лідэруюць раёны Цэнтр – 156 рейсаў і Граевка – 116. Другую групу раёнаў, складаюць Кіевка, Восток, Вулька, ў якіх сярэдняе лічба рейсаў па астановак раёна больш 80. Найменшым сярэднім колькасцю рейсаў па астановак раёна характэрызуюцца раёны Котельня-Боярская (20), Катин Бор (20), Красны Двор (14).

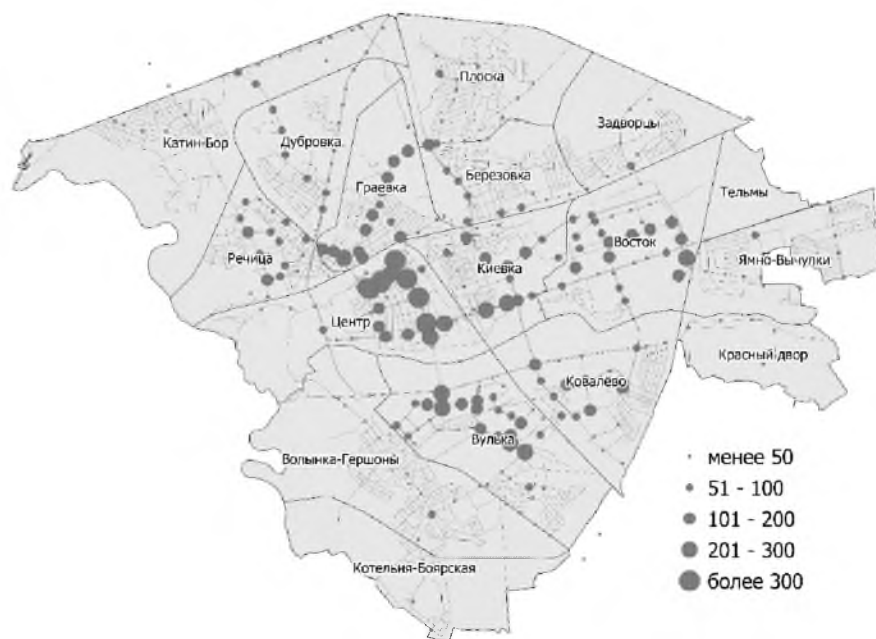


Рисунок 6. – Количество рейсов автобусов по остановкам общественного транспорта в будни

Таблица 2. – Характеристика остановок планировочных районов г. Бреста по количеству автобусных рейсов в будни

Планировочный район	Структура остановок по количеству рейсов, %					Среднее количество рейсов по остановкам
	<50	51–100	101–200	201–300	>300	
Березовка	50	44	6	–	–	48
Волынка – Гершоны	93	7	–	–	–	29
Восток	31	38	28	3	–	86
Вулька	48	21	21	10	–	85
Граевка	22	11	61	6	–	116
Дубровка	50	50	–	–	–	55
Задворцы	86	14	–	–	–	30
Катин Бор	90	10	–	–	–	20
Киевка	32	32	26	10	–	88
Ковалево	53	21	26	–	–	71
Котельня-Боярская	100	–	–	–	–	20
Красный Двор	100	–	–	–	–	14
Плеска	88	6	6	–	–	30
Речица	35	53	12	–	–	60
Тельмы	100	–	–	–	–	27
Центр	34	14	17	14	21	156
Ямно – Вычулки	93	7	–	–	–	25

Результаты итоговой оценки планировочных районов г. Бреста по уровню развития пассажирского автобусного транспорта представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Ранжирование планировочных районов г. Бреста по уровню развития пассажирского автобусного транспорта

Район	Количество остановок	Плотность остановок	Количество маршрутов	Плотность маршрутов	Среднее количество маршрутов по остановкам	Среднее количество рейсов по остановкам	Сумма рангов	Итоговый ранг
	Ранг							
Березовка	7	7	7	7	8	9	45	8
Волынка-Гершоны	8	15	12	13	14	12	74	12
Восток	2	5	4	4	4	4	23	4
Вулька	1	1	5	6	7	5	25	5
Граевка	5	3	3	3	2	2	18	3
Дубровка	9	11	11	9	6	8	54	9
Задворцы	10	16	15	15	10	10	76	13
Катин Бор	3	12	8	11	12	16	62	11
Киевка	4	2	2	1	3	3	15	2
Ковалево	4	9	6	5	5	6	35	6
Котельня-Боярская	12	17	16	17	15	15	92	16
Красный Двор	11	13	17	16	17	17	91	15
Плоска	6	10	10	10	11	11	58	10
Речица	6	4	9	8	9	7	43	7
Тельмы	12	14	13	12	13	13	77	14
Центр	2	6	1	2	1	1	13	1
Ямно – Вычулки	8	8	14	14	16	14	74	12

По итогам оценки установлено, что наилучшим уровнем развития автобусного пассажирского транспорта характеризуется планировочный район Центр. Этот район выделяется высокими значениями практически всех оцениваемых показателей за исключением плотности автобусных остановок. Это обусловлено нахождением в составе района значительного по площади мемориального комплекса «Брестская крепость-герой», на территории которого по объективным причинам отсутствуют автобусные остановки. Нахождение данного района в верху рейтинга оправдано его чрезвычайной важностью для города в целом. Вторым и третьим по уровню развития автобусного пассажирского транспорта являются районы Киевка и Граевка. Высокие места в итоговом рейтинге объясняются их местоположением рядом с районом Центр и ролью транзитных коридоров, обеспечивающих связь центра с другими районами.

Хорошим уровнем развития автобусного пассажирского транспорта выделяются районы Восток, Вулька, Ковалево. Такая ситуация представляется закономерной учитывая их густонаселенность и важность в качестве центров промышленного производства. Районами с наихудшим уровнем развития автобусного транспорта являются Котельня-Боярская, Красный Двор, Тельмы, Задворцы. Указанным районам ввиду либо отсутствия населения, либо малой его численности уделяется мало внимания в плане развития автобусного пассажирского транспорта. В перспективе при условии роста численности населения ситуация здесь может измениться.

Заклучение

В ходе проведенного исследования собрана база данных, характеризующая уровень развития автобусного транспорта в разрезе планировочных районов г. Бреста, и осуществлены расчеты ряда показателей развития пассажирского автобусного транспорта.

Установлено, что все районы с преобладанием многоэтажного типа жилой застройки (Центр, Восток, Вулька, Ковалево) характеризуются высоким уровнем развития автобусного сообщения. Кроме того, некоторые районы со смешанным типом жилой застройки (Киевка и Граевка) также выделяются высоким уровнем развития автобусного транспорта, что объясняется их транзитной ролью, ввиду расположения в центральной части города. В то же время районы преобладания жилой застройки усадебного типа характеризуются значительно более низкими значениями всех оцениваемых показателей. Таким образом, определяющую роль в уровне развития автобусного транспорта в условиях г. Бреста играют тип жилой застройки и местоположение района.

Полученные в ходе исследования данные могут быть использованы для оптимизации и дальнейшего развития маршрутной и остановочной сети автобусного сообщения в г. Бресте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лашко, С. И. Транспортная проблема: анализ, перспективы и предложения / С. И. Лашко, М. В. Федорович // Науч. вестн. ЮИМ. – 2018. – № 1. – С. 24–29.
2. Расписание движения [Электронный ресурс] / Коммунальное унитарное предприятие «Брестский общественный транспорт». – Режим доступа: <http://ap1.brest.by/raspisanie-dvizheniya>. – Дата доступа: 03.04.2022.
3. Синергия концептов развития транспортных систем в условиях современной урбанизации России : монография / И. Н. Пугачев [и др.] ; СПбГАСУ. – СПб., 2019. – 212 с.

REFERENCES

1. Lashko, S. I. Transportnaja probliema: analiz, pierspiektivny i priedlozhenija / S. I. Lashko, M. V. Fiedorovich // Nauch. viestn. JuIM. – 2018. – № 1. – S. 24–29.
2. Raspisanije dvizhenija [Eliكتروнный riesurs] / Kommunal'noje unitarnoje priedpriajtije «Briestskij obshhiestviennyj transport». – Riezhim dostupa: <http://ap1.brest.by/raspisanie-dvizheniya>. – Data dostupa: 03.04.2022.
3. Sinergija konceptov razvitija transportnykh sistiem v uslovijakh sovriemiennoj urbanizacii Rossii : monografija / I. N. Pugachiov [i dr.] ; SPbGASU. – SPb., 2019. – 212 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 14.02.2022

Да ведама аўтараў

Рэдаклегія 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.;
- міжрадкавы 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 спасылкаў 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 зносак.

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:

- выпіска 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 заклочэнне (для аспірантаў і дактарантаў).

Усе артыкулы абавязкова праходзяць «сляпое» рэцэнзаванне. Рукапісы, аформленыя не ў адпаведнасці з выкладзенымі правіламі, рэдаклегія 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 12.07.2022. Фармат 60×84/8. Папера афсетная. Гарнітура Таймс. Рызаграфія.

Ум. друк. арк. 11,63. Ул.-выд. арк. 7,71. Тыраж 100 экз. Заказ № 199.

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.