

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3 (156)

Естественные науки

Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины

ИЗВЕСТИЯ

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь
(свидетельство о регистрации
№ 546 от 06.07.2009 года)

Журнал включен ВАК Республики Беларусь
в перечень научных изданий Республики Беларусь,
в которых публикуются результаты
диссертационных исследований
(приказы № 207 от 13.12.2005, № 9 от 15.01.2010,
№ 57 от 16.05.2013)

Журнал включен в библиографические базы данных
ВИНИТИ и Научную электронную библиотеку
eLIBRARY.RU

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор С.А. ХАХОМОВ,
д-р физ.-мат. наук, доцент
Зам. главн. редактора Д.Л. КОВАЛЕНКО,
канд. физ.-мат. наук, доцент
Зам. главн. редактора А.Р. МИРОТИН,
д-р физ.-мат. наук, профессор
Зам. главн. редактора Г.Г. ГОНЧАРЕНКО,
д-р биол. наук, профессор, член-корр. НАН Беларуси

Члены редакционной коллегии:

Ф.В. Кадол, д-р пед. наук, проф.
В.Н. Калмыков, д-р филос. наук, проф.
В.И. Коваль, д-р филол. наук, проф.
И.В. Семченко, д-р физ.-мат. наук, проф.,
член-корр. НАН Беларуси
В.С. Смородин, д-р тех. наук, проф.
В.М. Хомич, д-р юрид. наук, проф.
О.Г. Шляхтова, ответственный секретарь

Члены редакционной коллегии
по естественным наукам:

В.С. Аверин, д-р биол. наук, проф.
В.Ф. Багинский, д-р с.-х. наук, проф., член-корр.
НАН Беларуси
А. Баллестер-Болинше (Испания), д-р, проф. математики
Ван Сяо Фэн (Китай), д-р тех. наук, проф.
Го Вэньбинь (Китай), д-р физ.-мат. наук, проф.
В.П. Кудин, д-р тех. наук, проф.
А.А. Махнев (Россия), д-р физ.-мат. наук, проф.,
член-корр. РАН
В.В. Можаровский, д-р тех. наук, проф.
А.Н. Сердюков, д-р физ.-мат. наук, проф., член-корр.
НАН Беларуси
А.Н. Скиба, д-р физ.-мат. наук, проф.
Шэн Рикун (Китай), д-р тех. наук, проф.
Р. Эстебан Ромеро (Испания), д-р, проф. математики

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
246028, Беларусь, Гомель, ул. Советская, 104,
Телефоны: +375 (232) 51-03-21
E-mail: vesti@gsu.by
Интернет-адрес: <http://vesti.gsu.by>

Francisk Skorina Gomel State University

PROCEEDINGS

The Journal is registered in the Ministry of Information of
Republic of Belarus
(registration certificate
number 546 dated 06.07.2009)

The Journal is included in the Republic of Belarus High-
er Attestation Commission list of scientific publications
of the Republic of Belarus, which publish the main re-
sults for the degree of Doctor (Candidate) of Sciences
(order number 207 dated 13.12.2005, number 9 dated
15.01.2010, number 57 dated 16.05.2013)

The Journal is included in bibliographic databases of the
All-Russia Institute of Scientific and
Technical Information (VINITI), Scientific electronic
library eLIBRARY.RU

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief S.A. KHAKHOMOV,
Sc. D., Docent of Physics
Deputy editor-in-chief D.L. KOVALENKO,
PhD, Associate Professor
Deputy editor-in-chief A.R. MIROTIN,
Sc. D., Professor
Deputy editor-in-chief G.G. GONCHARENKO,
Sc. D., Professor, Corresponding Member NASB

Members of editorial board:

F. V. Kadol, Sc. D., Professor
V.N. Kalmykov, Sc. D., Professor
V.I. Koval, Sc. D., Professor
I.V. Semchenko, Sc. D., Professor,
Corresponding Member NASB
V.S. Smorodin, Sc. D., Professor
V.M. Homich, Sc. D., Professor
O.G. Shlyahтова, executive secretary

Members of editorial board
for the natural sciences

V.S. Averin, Sc. D., Professor
V.F. Baginsky, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A. Ballister-Bolinshes (Spain), Sc. D., Professor
Van Siao Fen (China), Sc. D., Professor
Go Wenbin (China), Sc. D., Professor
V.P. Kudzin, Sc. D., Professor
A.A. Makhnev (Russia), Sc. D., Professor,
Corresponding Member RAS
V.V. Mozharovsky, Sc. D., Professor
A.N. Serdukov, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A.N. Skiba, Sc. D., Professor
Shen Riku (China), Sc. D., Professor
R. Esteban Romero (Spain), Sc. D., Professor

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:
246028, Belarus, Gomel, Sovetskaya Str., 104,
Tel: +375 (232) 51-03-21
E-mail: vesti@gsu.by
Site: <http://vesti.gsu.by>

© Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», 2026
© Educational Establishment «Francisk Skorina Gomel State
University», 2026

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2026, № 3 (156) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:
БИОЛОГИЯ • ТЕХНИКА (ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ;
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ; ЭЛЕКТРОНИКА) • МАТЕМАТИКА • ФИЗИКА

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

- Аверин В.С., Цуриков А.Г., Цурикова Н.В., Лазаренко И.К. Динамика содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. зоны планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС 5
- Бачура Ю.М., Новикова А.А. Оценка влияния альгоцианобактериальных комплексов на параметры почвенного плодородия и продуктивность агрофитоценоза озимого ячменя 10
- Болсун И.М. Анализ лихенофильной микобиоты представителей родов *Bryoria* и *Usnea* Беларуси 17
- Бутько А.А., Родькин О.И., Пашинский В.А. Перспективы использования многолетних трав в конструкции зонированных буферных полос для минимизации загрязнения водных экосистем азотом 24
- Ветлина В.П., Цуриков А.Г. Ревизия лихенологического гербария Национального парка «Припятский» 31
- Галиновский Н.Г., Евенкова М.В. К изучению ассамблей жесткокрылых (*Ectognatha*, *Coleoptera*) прибрежных экосистем озера Волотовское 36
- Гулаков А.В., Дроздов Д.Н. Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких промысловых копытных животных в зависимости от возрастной и половой структуры 43
- Концевая И.И., Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Дайнеко Д.В. Влияние препарата микробного Грамисил на взаимоотношения эколого-трофических групп почвы в посевах озимого ячменя 48
- Лебедев Н.А., Радкевич А.А., Крук А.В. Влияние зараженности метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* (Nordmann, 1832) на упитанность молоди карповых рыб в пойменном водоеме бассейна р. Припять 54

ИНФОРМАТИКА

- Березовская Е.М., Козликовская В.В. Гибридная архитектура цифрового наставника: онтология жизненных компетенций, NLP-анализ диалогов и кластеризация траекторий взросления 60
- Прохоренко В.А., Никитюк Ю.В., Смородин В.С., Середа А.А., Соколов С.И. Разработка средств мониторинга в режиме реального времени технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол 64

МАТЕМАТИКА

- Бородич Р.В., Бородич Е.Н., Бузланов А.В. *О пересечении θ -подгрупп, не содержащих \mathfrak{F} -корадикал*..... 71
- Бураковский В.В. *О стационарном режиме в СМО с конечным числом приборов и разнотипными заявками*..... 77
- Рудько Я.В. *Об отсутствии, неединственности и разрушении классических решений смешанных задач для некоторых полулинейных гиперболических результатов*..... 81

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Фаняев И.А., Тимошенко А.А., Самофалов А.Л., Семченко И.В., Хахомов С.А. *Сравнительный анализ антенных систем Ka-диапазона с сетью питания на основе несимметричной и симметричной полосковых линий*..... 86
- Янцевич М.А., Филиппович Г.А., Коноплицкий А.С., Исаев В.О. *Электрические фильтры с переходными частотными характеристиками* 92

ФИЗИКА

- Никитюк Ю.В., Баевич Г.А., Максименко А.В., Сердюков А.Н. *Моделирование термомеханического поведения стали 30ХГСН2А при импульсной лазерной наплавке проволочных материалов*..... 97
- Станчик А.В., Гременок В.Ф., Григаль П.А., Труханов А.В., Бускис К.П., Дашкевич Е.С., Жигулин Д.В., Сяосу Жао. *Особенности формирования морфологии пленок $MoSe_x$, полученных двухэтапным методом*..... 103

ЭЛЕКТРОНИКА

- Лушакова М.С., Мадвейко С.И., Купо А.Н. *Феноменологическое моделирование и экспериментальная оценка скорости плазменного травления кремния в комбинированном разряде*..... 110

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Левшунова Л.А., Саварин А.А. *Находки барсука (*Meles meles*) в Ветковском районе Гомельской области*..... 117
- Островский А.М. *О находке мокрицы *Ligidium hurnorum* (Cuvier, 1792) на территории Речицкого района Гомельской области*..... 120
- Пугачёв М.М., Тюменков Г.Ю. *Межзвёздный объект 3I/ATLAS: реалии и фантазии ...* 122

PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2026, № 3 (156) •

NATURAL SCIENCES:

BIOLOGY • TECHNIQUE (INFORMATION TECHNOLOGY;
RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS; ELECTRONICS)

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Averin V.S., Tsurikov A.G., Tsurikova N.V., Lazarenko I.K. <i>Dynamics of ^{137}Cs content in the lichen <i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr. in the emergency protective measures planning zone of the territory affected by the Belarusian NPP</i>	5
Bachura Yu.M., Novikova A.A. <i>Evaluation of the influence of algocyanobacterial complexes on soil fertility parameters and productivity of winter barley agrophytocenosis</i>	10
Bolsun I.M. <i>Analysis of the lichenophilic mycobiota of representatives of the genera <i>Bryoria</i> and <i>Usnea</i> in Belarus</i>	17
Butko A.A., Rodkin O.I., Pashinsky V.A. <i>Prospects for the use of perennial grasses in the design of zoned buffer strips to minimize nitrogen pollution of aquatic ecosystems</i>	24
Vetlina V.P., Tsurikov A.G. <i>Revision of the lichenological herbarium of the Pripyatsky National Park</i>	31
Halinouski M.G., Yeviankova M.V. <i>To the study of beetle assemblages (Ectognatha, Coleoptera) of coastal ecosystems of Lake Volotovskoye</i>	36
Gulakov A.V., Drozdov D.N. <i>The specific activity of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in the bodies of wild game ungulates, depending on the age and sex structure</i>	43
Kontsevaya I.I., Daineko N.M., Timofeev S.F., Daineko D.V. <i>The influence of the microbial preparation Gramisil on the relationships between eco-trophic groups of soil in winter barley crops</i>	48
Lebedzeu M.A., Radkevich H.A., Kruk A.V. <i>The effect of infection with <i>Posthodiplostomum cuticola</i> (Nordmann, 1832) metacercariae on the body condition of juvenile cyprinid fish in a floodplain reservoir of the Pripyat River basin</i>	54

INFORMATION TECHNOLOGY

Berezovskaya E.M., Kozlikovskaya V.V. <i>Hybrid architecture of a digital mentor: ontology of life competencies, NLP analysis of dialogues, and clustering of maturation trajectories</i>	60
Prohorenko V.A., Nikityuk Yu.V., Smorodin V.S., Sereda A.A., Sokolov S.I. <i>Development of real-time monitoring tools for the laser polishing process of quartz glass</i>	64

MATHEMATICS

Borodich R.V., Borodich E.N., Buzlanov A.V. <i>On the intersection of θ-subgroups that do not contain an \mathfrak{F}-residual</i>	71
Burakovskiy V.V. <i>On the steady-state mode in a queueing system (QS) with a finite number of devices and various types of requests</i>	77
Rudzko J.V. <i>On the absence, non-uniqueness, and blow-up of classical solutions of mixed problems for some semilinear hyperbolic equations</i>	81

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Faniaev I.A., Timoshenko A.A., Samofalov A.L., Semchenko I.V., Khakhomov S.A. <i>Comparative analysis of Ka-band antenna systems with a feeding network based on asymmetric and symmetric striplines</i>	86
Yantsevich M.A., Philippovich G.A., Konoplitsky A.S., Isaev V.O. <i>Electrical filters with transient frequency characteristics</i>	92

PHYSICS

Nikityuk Yu.V., Baevich G.A., Maksimenko A.V., Serdyukov A.N. <i>Simulation of the thermomechanical behavior of 30XГCH2A steel during pulsed laser cladding of wire materials</i>	97
Stanchik A.V., Gremenok V.F., Hryhal P.A., Trukhanov A.V., Buskis K.P., Dashkevich H.S., Zhyhulin D.V., Xiaoxu Zhao. <i>Morphological features of MoSe_x films obtained by a two-stage method</i>	103

ELECTRONICS

Lushakova M.S., Madveiko S.I., Kupo A.N. <i>Phenomenological modeling and experimental evaluation of the rate of plasma etching of silicon in a combined discharge</i>	110
--	-----

ABSTRACTS

Levshunova L.A., Savarin A.A. <i>Findings of badger (<i>Meles meles</i>) in the Vetkovskiy district of the Gomel region</i>	117
Ostrovsky A.M. <i>On the record of woodlouse <i>Ligidium hypnorum</i> (Cuvier, 1792) in the Rechitsa district of the Gomel region</i>	120
Pugachev M.M., Tyumenkov G.Yu. <i>Interstellar object 3I/ATLAS: realities and fantasies</i>	122

Биология

УДК 57.04:546.36*137:582.29(476.6-37)Островец)

EDN: ALRBSO

Динамика содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.
зоны планирования срочных защитных мероприятий
территории воздействия Белорусской АЭС

В.С. АВЕРИН¹, А.Г. ЦУРИКОВ², Н.В. ЦУРИКОВА², И.К. ЛАЗАРЕНКО²

Изучено содержание ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* зоны планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС в течение 2022–2024 гг. Среднее значение содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* за три года изучения составило 42,4 Бк/кг возд. сухой массы. На основе полученных данных построена карта-схема содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования системы прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций, повышения уровня радиационной безопасности работников и населения, при организации радиационного мониторинга и радиационного контроля зоны планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС.

Ключевые слова: Белорусская атомная станция, радиоактивность, лишайники, мониторинг, лишеноиндикация.

The ^{137}Cs content in lichen *Xanthoria parietina* at the urgent protective action planning zone of the Belarusian Nuclear Power Plant impact area was studied during 2022–2024. The average ^{137}Cs content in *Xanthoria parietina* lichen over the three years of study was 42,4 Bq/kg of dry air mass. Based on the obtained data, distributional maps of ^{137}Cs content in *Xanthoria parietina* within the study area were constructed. The research results can be used to improve the emergency forecasting and prevention system, increase the level of radiation safety for workers and the population, as well as organizing radiation monitoring and radiation control in the urgent protective action planning zone of the Belarusian Nuclear Power Plant impact area.

Keywords: Belarusian Nuclear Power Plant, radioactivity, lichens, monitoring, lichen indication.

Введение. Влияние предприятий промышленности и энергетики на состояние окружающей среды обычно оценивают по сумме и составу выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, водоемы, почву. Однако использование данных только химических и физико-химических методов анализа является не вполне эффективным. Для интегральной оценки техногенной нагрузки на окружающую среду используются методы биотестирования, основанные на регистрации ответных реакций живых организмов на одновременное или последовательное действие всех видов загрязнения. Ценными организмами для осуществления биомониторинга являются лишайники, обладающие способностью поглощать загрязняющие вещества из воздуха и осадков и в гораздо меньшей степени – из субстрата произрастания [1], [2].

Лишайники играют важную роль в мониторинге и оценке состояния окружающей среды при анализе воздействия промышленных выбросов. Они проявляют чувствительность к целому ряду поллютантов и отражают качество воздуха, а также изменение климатических факторов. Лишайники позволяют отслеживать динамику накопления загрязняющих веществ, поэтому являются наиболее чувствительными биоиндикаторами загрязнения воздуха на региональном уровне [1]–[3].

В силу своих специфических особенностей (длительная продолжительность жизни, медленная метаболическая активность), лишайники накапливают радионуклиды, выпадающие с осадками из атмосферы, что позволяет их использовать в качестве биоиндикаторов радиоактивного загрязнения [4]. Лишайники обладают преимуществами при определении выпадаю-

щих из атмосферы радионуклидов, такими как большое соотношение поверхности к объему и отсутствие корней. Со временем они сохраняют довольно однородную морфологию, что позволяет вести учет истории поступления радионуклидов в окружающую среду [5], [6].

Для получения полной и детальной информации об уровнях загрязнения экосистемы, а также прогнозирования обстановки в условиях интенсивного ведения сельского хозяйства на территории, прилегающей к Белорусской АЭС, в дополнение к действующей системе мониторинга [7] были созданы стационарные площадки для осуществления долгосрочного экологического мониторинга состояния атмосферного воздуха в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС на основе метода лишеноиндикации [8], [9]. Разработанная система является надежной основой для решения комплексной задачи эффективного управления территорией, прилегающей к Белорусской АЭС.

В настоящей работе приводятся первые данные о динамике содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. зоны планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС.

Материал и методы исследования. Радиоэкологическая обстановка на прилегающей к Белорусской АЭС территории характеризуется следующими показателями. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs составляет менее 2 кБк/м², ^{90}Sr – менее 1 кБк/м². По этим показателям район сопоставим с остальной территорией республики, загрязненной только глобальными выпадениями от испытаний ядерного оружия (с плотность загрязнения по ^{137}Cs менее 2,6 кБк/м² и по ^{90}Sr менее 1,8 кБк/м²). Мощность эквивалентной дозы в воздухе составляет менее 0,15 мкЗв/ч и полностью определяется естественным радиоактивным фоном. Содержание ^{137}Cs в продукции сельского хозяйства в настоящее время не превышает значения минимально детектируемой активности (менее 3 Бк/кг). Удельная активность ^{90}Sr в продукции сельскохозяйственного производства не превышает 1 Бк/кг, что в десятки раз ниже по сравнению с действующими нормативами.

В целом, по величинам содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в компонентах агроэкосистем исследуемая территория не отличается от сопредельных районов, загрязненных только глобальными выпадениями в результате испытаний ядерного оружия.

Для осуществления долгосрочного экологического мониторинга состояния окружающей среды в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС с учетом особенностей встречаемости и биомассы лишайника *Xanthoria parietina* нами было заложено 16 точечных реперных площадок для отбора проб лишайников (таблица 1).

Таблица 1 – Расположение точечных реперных площадок

№	Локалитет	Расстояние и направление от БелАЭС	Координаты
1	аглогородок Гервяти	7,5 км на юг	54°41'15.9"N, 26°08'51.2"E
2	аглогородок Ворняны	5,5 км на юго-запад	54°43'27.2"N, 26°00'47.8"E
3	поселок Гоца	3,5 км на северо-запад	54°46'35.2"N, 26°01'49.8"E
4	поселок Швейляны	4,1 км на восток	54°44'39.9"N, 26°09'55.5"E
5	лесной массив, 500 м на северо-запад от д. Попишки	3 км на юг	54°43'16.3"N, 26°06'31.4"E
6	насаждения в д. Мацки	8 км на юг	54°40'05.8"N, 26°06'52.6"E
7	лесной массив 1 км на юго-восток от д. Ольгиняны	12 км на юг	54°37'45.5"N, 26°05'49.3"E
8	лесной массив	3 км на запад	54°45'12.0"N, 26°02'34.1"E
9	лесной массив 1 км на юго-запад от д. Ворона	8 км на запад	54°44'54.1"N, 25°56'38.1"E
10	лесополоса 0,3 км на юг от д. Трокеники	12 км на запад	54°44'47.4"N, 25°53'51.9"E
11	лесной массив 0,6 на юг от д. Мешляны	3 км на север	54°47'25.5"N, 26°05'45.8"E
12	насаждения в д. Заборцы	9 км на север	54°49'03.6"N, 26°06'49.9"E
13	насаждения 1 км на север от д. Подольцы	12 км на север	54°52'44.9"N, 26°04'35.7"E
14	лесной массив 1 км на восток от д. Валайкуны	3 км на восток	54°45'38.2"N, 26°09'10.0"E
15	лесной массив 0,1 км на юг от д. Кирели	9 км на восток	54°44'53.9"N, 26°13'17.2"E
16	насаждения в д. Шимонели	12 км на восток	54°46'11.9"N, 26°19'21.1"E

Точки отбора образцов лишайников, а также расположение закладываемых точечных реперных площадок фиксировали в системе координат WGS 84 с использованием навигатора Garmin GPSMap 62s.

Отбор проб лишайников *Xanthoria parietina* осуществляли 29 и 30 октября 2022 г., 12 и 13 августа 2023 г. и 25 и 26 августа 2026 г. Отбор проб проводили с четырех экспозиций ствола форофита на высоте 1–2 м. Лишайники отбирали с древесных пород одного вида и возраста в пределах точечной реперной площадки. В абсолютном большинстве площадок субстратом произрастания лишайника выступала осина (*Populus tremula* L.). Слоевища укладывали в бумажные конверты и сушили до воздушно-сухого состояния. Измерение концентраций ^{137}Cs в образцах лишайников проводили на базе лаборатории проблем почвоведения и реабилитации антропогенно нарушенных лесных земель ГНУ «Институт леса Национальной академии наук Беларуси», аккредитованной государственным предприятием «Белорусский государственный центр аккредитации» на соответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения содержания ^{137}Cs в отобранных образцах лишайника *Xanthoria parietina* зоны планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС в 2022, 2023 и 2024 годах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* в зоне воздействия БелАЭС, Бк/кг возд-сух. массы

№	Направление от БелАЭС / локалитет	Содержание ^{137}Cs Бк/кг		
		2022	2023	2024
1	3 км на юг	17,4	44,5	48,0
2	8 км на юг	17,9	46,9	41,0
3	12 км на юг	65,8	44,0	22,6
4	3 км на запад	19,7	41,9	32,5
5	8 км на запад	19,5	–	44,8
6	12 км на запад	23,4	–	32,0
7	3 км на север	47,6	35,2	45,2
8	9 км на север	111,8	32,0	24,5
9	12 км на север	24,1	132,1	31,3
10	3 км на восток	86,7	37,3	38,4
11	9 км на восток	25,1	37,2	42,7
12	12 км на восток	18,1	41,9	61,6
13	а.г. Ворняны	17,8	–	49,5
14	д. Гоза	60,6	30,6	29,3
15	а.г. Гервяты	67,4	–	29,7
16	д. Швейляны	–	–	37,1
Среднее значение		41,5	47,6	38,1

Среднее значение содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* за три года изучения составило 42,4 Бк/кг возд. сухой массы. Максимальные значения содержания ^{137}Cs выявлены в северном направлении в пробах в 1 км на север от д. Подольцы и вблизи д. Заборцы и составили 132,1 и 111,8 Бк/кг возд. сухой массы соответственно. На основе полученных данных построены карты-схемы содержания ^{137}Cs в лишайнике *Xanthoria parietina* в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС (рисунок 1).

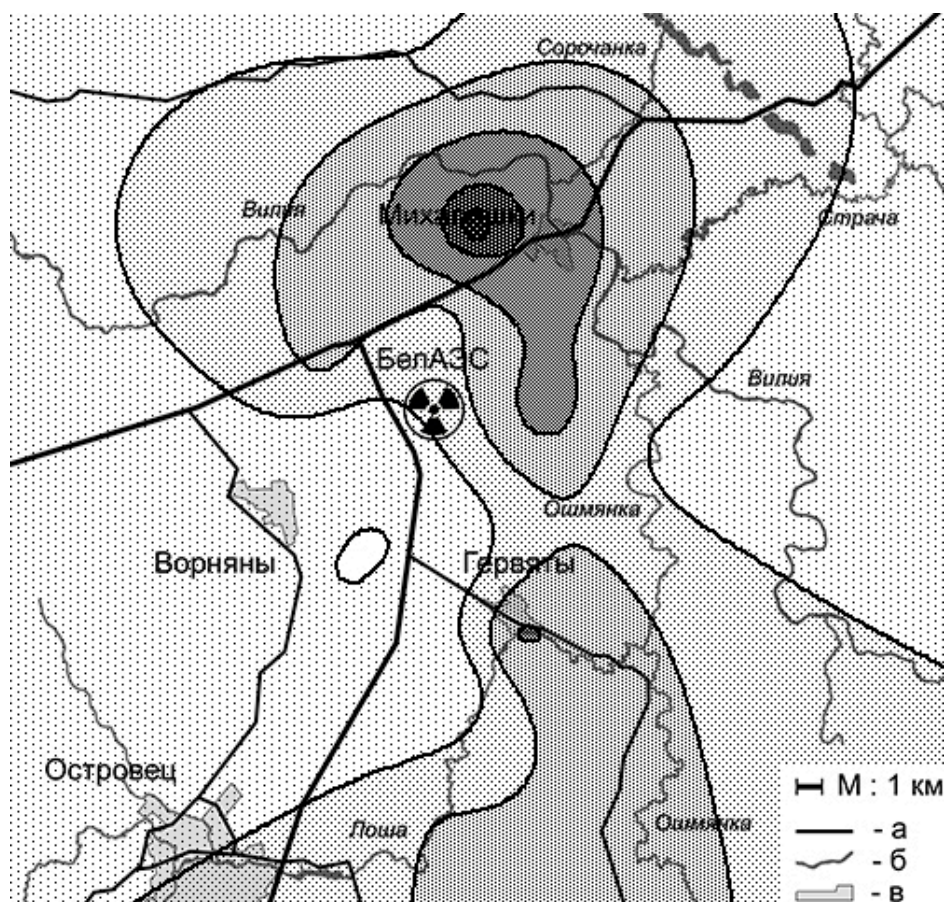


Рисунок 1 – Карта-схема распределения содержания ^{137}Cs (Бк/кг возд. сухой массы) в лишайнике *Xanthoria parietina* в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС (по данным 2022 г. исследований): а – автомагистрали, б – реки, в – территории населенных пунктов

Для сопоставления полученных результатов было проведено определение содержания ^{137}Cs в эпифитном лишайнике *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., отобранном на территории Национального парка (НП) «Беловежская пуща», а также в эпифитных лишайниках *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Parmelia sulcata* Tayl. и *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach., отобранных на территории учебно-научной базы (УНБ) учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» «Ченки». Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание ^{137}Cs в лишайниках, отобранных на территории НП «Беловежская пуща» (Каменецкий район) и УНБ «Ченки» (Гомельский район) в 2021 г.

№	Вид лишайника	Место отбора	Удельная активность Бк/кг
1	<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Nyl.	НП «Беловежская пуща»	11,1–88,4
2	<i>Evernia prunastri</i> (L.) Ach.	УНБ «Ченки»	60,9–169,9
3	<i>Parmelia sulcata</i> Tayl.	УНБ «Ченки»	84,3–101,9
4	<i>Ramalina pollinaria</i> (Westr.) Ach.	УНБ «Ченки»	118,8–506,0

Таким образом, можно заключить, что зона планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС является достаточно чистой.

Заключение. Полученные результаты имеют ценность как для Министерства по чрезвычайным ситуациям и Минприроды, так и для Министерства лесного хозяйства. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования системы прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций, повышения уровня радиационной безопасности работников и населения, при организации радиационного мониторинга и радиационного контроля зоны планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС.

Литература

1. Бязров, Л. Г. Лишайники в экологическом мониторинге / Л. Г. Бязров. – М. : Научный мир, 2002. – 336 с.
2. Цуриков, А. Г. Лишайники юго-востока Беларуси / А. Г. Цуриков. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2013. – 276 с.
3. Interplay of heavy metal accumulation, physiological responses, and microbiome dynamics in lichens: insights and future directions / M. Thakur, A. Bhatt, V. Sharma, V. Mathur // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Vol. 196. – P. 926.
4. Bryophytes and lichens as fallout originated radionuclide indicators in the Svalbard archipelago (High Arctic) / M. Saniewski [et al.] // *Polar Science*. – 2020. – Vol. 25. – P. 100536.
5. Dalvand, A. Introduce lichen *Lepraria incana* as biomonitor of Cesium-137 from Ramsar, northern Iran / A. Dalvand, A. Jahangiri, J. Iranmanesh // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – Vol. 160. – P. 36–41.
6. Бязров, Л. Г. Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения / Л. Г. Бязров. – М. : Издательство КМК, 2005. – 476 с.
7. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4. Часть 8. Отчет об ОВОС. Часть 8.2. Текущее состояние окружающей среды. Пояснительная записка (редакция 06.07.2010 г.). – Минск : Белнипиэнергопром, 2010. – 183 с.
8. Цуриков, А. Г. Выбор точечных реперных площадок в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС с целью лишеноиндикации / А. Г. Цуриков, В. С. Аверин // *Радиобиология и экологическая безопасность – 2022 : материалы Междунар. науч. конф., Гомель, 26–27 мая 2022 г. / ГНУ «Институт радиобиологии НАНБ»; редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]*. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – С. 168–170.
9. Аверин, В. С. Создание системы лишеномониторинга для оценки распределения неорганических поллютантов в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС / В. С. Аверин, А. Г. Цуриков, Н. В. Цурикова, И.В. Грищенко // *Актуальные проблемы медицины : сб. науч. ст. Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Гомель, 10 ноября 2023 г. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, ГомГМУ ; редкол.: И. О. Стома [и др.]*. – Гомель : ГомГМУ, 2023. – С. 118–120.

¹Гомельский государственный
медицинский университет

²Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 20.12.2025

Оценка влияния альгоцианобактериальных комплексов на параметры почвенного плодородия и продуктивность агрофитоценоза озимого ячменя

Ю.М. БАЧУРА, А.А. НОВИКОВА

В статье представлены данные о влиянии альгоцианобактериальных комплексов на ряд агрохимических параметров почвы и морфологические показатели ячменя. Внесение фототрофов привело к увеличению содержания в ризосфере подвижного калия на 358 мг⁻¹ и органического вещества на 0,41 %. При изучении продуктивности агрофитоценоза ячменя наибольшее количество растений отмечено в вариантах с монокультурами микроорганизмов. Максимальные показатели длины колоса (171,4 мм) и количества зерен (31,5 шт) получены при внесении комплексов *Nostoc-Vischeria* в соотношении 2:1, массы зерна (1,25 г) – в соотношении 1:2.

Ключевые слова: цианобактерии, микроводоросли, фитостимулирующее действие, озимый ячмень, почва.

The article presents data on the effect of algocyanobacterial complexes on a number of agrochemical parameters of soil and morphological traits of barley. The introduction of phototrophs led to an increase in the content of exchangeable potassium by 358 ppm and organic matter by 0,41 % in the rhizosphere. When studying the productivity of the barley agrophytocenosis, the highest plant number was observed in the variants with monocultures of microorganisms. Maximum spike length (171,4 mm) and grain number per spike (31,5) were obtained with the application of *Nostoc-Vischeria* complexes in a 2:1 ratio, while grain weight per spike (1,25 g) was highest with a 1:2 ratio.

Keywords: cyanobacteria, microalgae, plant growth-promoting effect, winter barley, soil.

Введение. Агрофитоценозы – основа сельскохозяйственного производства, их продуктивность и устойчивость напрямую зависят от уровня почвенного плодородия и применяемых агротехнологий. В современных условиях интенсивного земледелия, характеризующегося широким применением минеральных удобрений и сопутствующими экономическими и экологическими издержками, особую значимость приобрели вопросы перехода к устойчивым агроприемам, рационализации использования почвы и повышения её качества [1]–[2]. Для решения данных вопросов активно внедряются биопрепараты, созданные на основе различных групп микроорганизмов, в том числе фототрофов, которые представлены микроводорослями и цианобактериями.

Широкий спектр экологических функций микроводорослей и цианобактерий обуславливает их высокий биотехнологический потенциал и актуальность дальнейшего изучения [3]–[7]. Имеются данные о влиянии данных групп фототрофных микроорганизмов как на показатели почвы, так и на рост и развитие высших растений [8]–[16]. Известно, что водоросли и цианобактерии могут улучшать агрегатный состав почвы за счёт выделения слизистых веществ, склеивающих почвенные частицы, обогащать пахотный слой органическим веществом и биодоступным азотом, а также мобилизовать труднорастворимые фосфаты [17], [18]. В отношении высших растений эти фототрофные микроорганизмы выступают продуцентами фитогормонов (ауксинов, цитокининов), витаминов и аминокислот, что стимулирует прорастание семян, ускоряет развитие корневой системы, надземных вегетативных и генеративных органов и способствует накоплению биомассы [19], [20].

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния суспензий цианобактерий рода *Nostoc*, микроводорослей рода *Vischeria* и их комплексов на динамику изменения агрохимических показателей почвы и продуктивность агрофитоценоза озимого ячменя.

Материал и методика исследований. Полевые исследования были проведены в 2025 г. в окрестностях агрогородка Лопатино Гомельского района Гомельской области на базе сельскохозяйственного предприятия ОАО «Агрокомбинат «Южный». Опытный участок располагался в агрофитоценозе озимого ячменя (*Hordeum vulgare* L.), который находится в севообороте с соблюдением агротехнических норм. Агрофитоценоз характеризуется дерново-подзолистыми легкосуглинистыми почвами, отсутствием значительных антропогенных нарушений (эрозия, переуплотнение) и однородностью почвенного покрова, что позволило минимизировать погрешности эксперимента.

В качестве тест-культур для изучения ростостимулирующей активности использовали суспензии азотфиксирующей почвенной цианобактерии рода *Nostoc* и микроводоросли *Vischeria magna*, являющихся типичными представителями альгоцианобактериальной флоры Республики Беларусь.

Микроводоросли и цианобактерии выращивали на основной среде Болда (Bold basal medium – BBM) при температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ при 10/14-часовом чередовании световой и темновой фаз и освещении 3500–4000 лк с барботированием в световой период. Учёт численности клеток почвенных микроводорослей и цианобактерий проводили с использованием камеры Горяева по стандартной методике [21]. Плотность суспензий цианей в серии экспериментов составила 25,7 млн клеток на 1 мл культуры, плотность суспензий вишерии – 29,75 млн клеток на 1 мл культуры. Маточную суспензию использовали для приготовления рабочей суспензии: разбавляли дистиллированной водой 1:9 для получения рабочего десятипроцентного раствора.

В фазу кущения озимого ячменя методом прикорневого полива проводили внесение микроорганизмов в 3-кратной повторности в количестве 500 мл рабочей суспензии на один ряд длиной 2 м в соответствии с вариантами опыта: 1) опыт I (разбавленная культура микроорганизма *Nostoc*); 2) опыт II (1 часть разбавленной культуры *Nostoc* : 2 части разбавленной культуры *Vischeria*, 1N:2V); 3) опыт III (1 часть разбавленной культуры *Nostoc* : 1 часть разбавленной культуры *Vischeria*, 1N:1V); 4) опыт IV (2 части разбавленной культуры *Nostoc* : 1 часть разбавленной культуры *Vischeria*, 2N:1V); 5) опыт V (разбавленная культура микроорганизма *Vischeria*); 6) контроль I (BBM); 7) контроль II (дистиллированная вода).

Для оценки действия инокулянтов проводили учёт элементов структуры урожая озимого ячменя в фазе восковой спелости. В соответствии с вариантами опыта отбирали растения, учитывая их количество, для измерения длины стебля, длины главного колоса с осями и без, учета продуктивности (количество зёрен, масса зёрен).

Изучение основных агрохимических показателей выполняли до внесения альгоцианобактериальных комплексов и после уборки урожая, отбирая по 30 репрезентативных проб в следующих зонах: ризосфера ячменя, корневая зона, междурядье, а также на контрольном участке вне поля. Отбор проб осуществляли послойно по горизонтам 0–5 см, 5–10 см и 10–15 см.

Почвенные образцы доводили до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, просеивали через сито диаметром ячеек 1 мм, гомогенизировали и квартовали. Анализ образцов почвы на содержание рН, фосфора, калия, органического вещества, кальция, магния проводили на базе КУП «Гомельская ОПИСХ».

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Базовые показатели плодородия почвы, зафиксированные в мае до внесения микроорганизмов, служат контрольным фоном для последующей оценки их эффективности. Данные позволяют оценить не только общий уровень обеспеченности элементами питания, но и пространственную неоднородность внутри поля (агроценоз ячменя) в сравнении с контрольным участком вне поля.

Анализ основных агрохимических показателей опытных делянок до внесения микроводорослей и цианобактерий представлен в таблице 1. Почва на делянке с ячменем была близка к нейтральной (средний показатель рН составлял 6,15), реакция почвенного раствора с глубиной изменялась незначительно как на делянке, так и вне поля. Растения проявляют различную чувствительность к кислой и щелочной среде. Снижение ростовых процессов наблюдается при рН ниже 5 и выше 8. Для произрастания большинства сельскохозяйственных культур рН солевой вытяжки почвы должен быть в диапазоне 5,5–7,0.

Таблица 1 – Основные агрохимические показатели опытных делянок (май)

Расположение	рН, ед. рН	p_2O_5 , млн ⁻¹	K_2O , млн ⁻¹	Орган. в-во, %	CaO, млн ⁻¹	MgO, млн ⁻¹	
Корневая зона	0–5	6,15	433	237	1,96	1325	291,85
	5–10	6,205	421	254	1,99	1265	290,9
	10–15	6,15	368	256	2,04	1247	278,75
Междурядье	0–5	6,08	349	253	1,85	1194	271,7
	5–10	6,145	473	308	1,95	1227,5	277,75
	10–15	6,17	446	316	1,99	1220	277,75

Окончание таблицы 1

Вне поля	0–5	6,365	561	610	4,81	2585,5	462,55
	5–10	6,39	608	532	3,99	2651	415,15
	10–15	6,245	578	530	4,19	2623,5	419,15
Ризосфера		6,16	402	410	2,1	1111	220,2

Важную роль в создании почвенного плодородия играет содержание гумуса, исследуемая почва характеризовалась низким содержанием гумуса (1,85–2,04) %, при переходе к нижележащим горизонтам показатель изменялся мало на всех участках.

Эффективное плодородие почв в отношении фосфатов определяется запасом подвижных форм фосфора. К этой группе относятся различные формы почвенных фосфатов, находящиеся в динамическом равновесии «твёрдая фаза почвы – раствор». Среднее содержание элементов питания в почве соответствует условиям, при которых можно получить средне-статистический урожай зерновых культур в данном регионе. Высокое содержание элемента соответствует условиям, при которых возможно возделывание высокотребовательных культур. Обеспеченность исследуемой почвы фосфором и калием была высокой. Содержание подвижного фосфора в корневой зоне при переходе к нижележащим горизонтам снижалось, между рядами и вне поля повышалось; содержание подвижного калия на участках поля по профилю почвы увеличивалось, вне поля – снижалось.

Кальций и магний являются важными элементами питания растений. Обеспеченность почвы делянок магнием повышенная (в пределах от 271,7 мг/кг до 291,85 мг/кг), кальцием – варьировала от повышенной (более 1201 мг/кг) на опытных участках до высокой на контрольном участке вне поля. По профилю почв содержание кальция и магния варьировало незначительно.

В целом на контрольном участке вне поля отмечено более высокое по сравнению с агроценозом ячменя содержание подвижных форм фосфора и калия, органического вещества, кальция и магния. В ризосфере установлено повышенное содержание подвижного калия и снижение количества кальция и магния по сравнению с почвой опытного участка.

Анализ основных агрохимических показателей опытных делянок после внесения микроводорослей и цианобактерий представлен в таблице 2. После внесения суспензий микроводорослей и цианобактерий почва на делянке с ячменем осталась близкой к нейтральной (средний показатель pH составлял 6,1), реакция почвенного раствора с глубиной изменялась незначительно как на опытных участках, так и на контрольном участке вне поля.

Содержание гумуса в исследуемой почве после внесения фототрофных микроорганизмов варьировало в пределах (1,85–2,04) %, при переходе к нижележащим горизонтам показатель на опытных площадках изменялся мало, вне поля отмечено снижение содержания органического вещества в нижних горизонтах.

Таблица 2 – Основные агрохимические показатели опытных делянок (август)

Расположение	pH, ед. pH	p ₂ O ₅ , млн ⁻¹	K ₂ O, млн ⁻¹	Орган. в-во, %	CaO, млн ⁻¹	MgO, млн ⁻¹	
Корневая зона	0–5	5,56	391,5	406	2,4	1309	217,15
	5–10	5,59	433	337	2,32	1271	214,15
	10–15	5,58	420	330	2,23	1341,5	280,3
Междурядье	0–5	5,945	472	307	2,40	1242	243,4
	5–10	5,97	460	277	2,31	1361	261,6
	10–15	5,985	463	280	2,29	1346,5	260,55
Вне поля	0–5	6,055	423	272	3,1	2010	309,05
	5–10	6,06	440	290	2,73	1872	314,1
	10–15	6,025	390	248	2,44	1915,5	300,95
Ризосфера		6,61	464	768	2,51	1221	262,6

Обеспеченность исследуемой почвы фосфором и калием была высокой. Содержание подвижного калия в корневой зоне при переходе к нижележащим горизонтам снижалось, на остальных участках содержание калия и фосфора по профилю почвы изменялось незначительно. Обеспеченность почвы опытной делянки магнием и кальцием была повышенной, контрольного участка вне поля – высокой. По профилю почв содержание кальция и магния варьировало незначительно.

На контрольном участке вне поля по сравнению с опытным участком отмечено более высокое содержание органического вещества, кальция и магния. В ризосфере установлено повышенное содержание подвижного калия и органического вещества по сравнению с почвой исследуемого опытного участка.

Сравнительный анализ агрохимических показателей опытных и контрольных участков до и после внесения суспензий микроводорослей и цианобактерий показал в корневой зоне снижение рН на 0,6 единиц по окончании опыта, увеличение подвижного калия на 109 млн^{-1} ; незначительное увеличение органического вещества, а также снижение содержания магния в верхних горизонтах почвы. В междурядьях установлено небольшое увеличение рН почвенного раствора (0,2 единицы), содержания органического вещества (0,4 %) и кальция, а также подвижного фосфора в слое (0-5) см (123 млн^{-1}). В ризосфере показано увеличение показателя рН на 0,45 единиц, подвижного калия на 358 млн^{-1} , кальция на 110 млн^{-1} , органического вещества на 0,41 %.

На контрольном участке вне поля после окончания эксперимента выявлено снижение анализируемых агрохимических показателей: рН на 0,3 единицы, подвижного фосфора на 165 млн^{-1} , подвижного калия на 287 млн^{-1} , органического вещества на 1,57 %, кальция на $687,5 \text{ млн}^{-1}$, магния на $124,3 \text{ млн}^{-1}$.

Анализ общего количества экземпляров ячменя на участках с различными вариантами внесения суспензий микроводорослей, цианобактерий и контрольных жидкостей показал выраженное положительное влияние применения суспензий микроводорослей рода *Nostoc* и микроводорослей рода *Vischeria*, а также их комплексов на сохранность посевов. Максимальные значения были зафиксированы в вариантах с культурами микроводоросли *Vischeria* (113 растений) и цианобактерии *Nostoc* (103 растения), что существенно превышало показатели контрольных групп (60 растений с дистиллированной водой и 53 растения с основной средой Болда) (рисунок 1).

В вариантах с совместным применением суспензий фототрофных микроорганизмов также отмечены высокие значения сохранности растений, особенно в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* состава 1N:2V (98 растений).

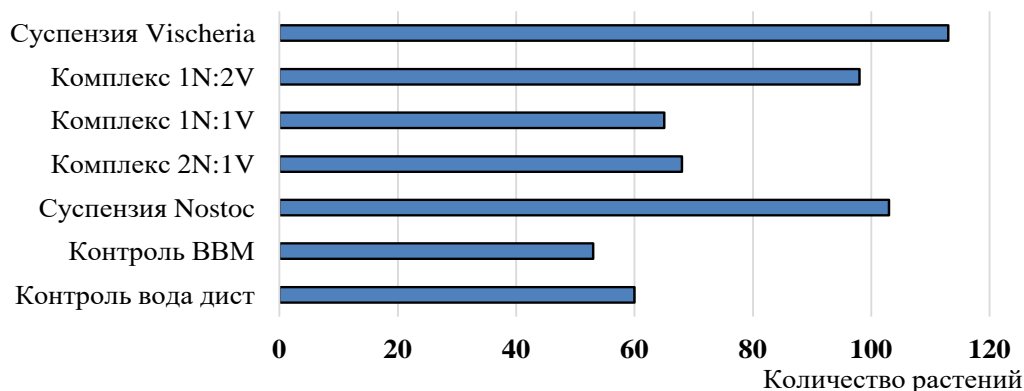


Рисунок 1 – Сравнение количества растений в поле в эксперименте

Полученные данные позволяют предположить, что использование суспензий изучаемых микроводорослей, цианобактерий и их комплексов способствует повышению жизнеспособности ячменя, возможно, за счет усиления устойчивости к абиотическим стрессам и улучшения минерального питания.

При сравнении длины стеблей ячменя было выявлено, что моноинокуляция суспензиями штаммов ностока ($(403,16 \pm 12,29) \text{ мм}$) и вишерии ($(459,64 \pm 10,31) \text{ мм}$) не оказала статистически значимого стимулирующего эффекта по сравнению с контролем дистиллированной водой ($(418,12 \pm 15,05) \text{ мм}$). Положительная динамика наблюдалась при совместном применении фототрофных микроорганизмов (рисунок 2). В вариантах опыта с альгоцианобактериальными комплексами состава 2N:1V ($(502,93 \pm 10,70) \text{ мм}$) и 1N:2V ($(501,07 \pm 9,16) \text{ мм}$) ус-

тановлен положительный фитозффект по отношению к контролю дистиллированной водой, по отношению к контролю с питательной средой стимулирующее влияние комплексов на длину стеблей не выявлено ($(520,77 \pm 12,62)$ мм).



Рисунок 2 – Сравнение морфометрических показателей ячменя

Анализ влияния суспензий микроводорослей, цианобактерий и их комплексов на длину колоса с осями показал преимущество использования комплексов *Nostoc* и *Vischeria* в соотношении 2:1 ($(171,43 \pm 5,74)$ мм) как относительно обоих контрольных вариантов, так и относительно вариантов опыта с чистыми суспензиями микроводоросли и цианобактерии.

При анализе фитозффектов по длине колоса ячменя без остей максимальные результаты установлены в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* состава 2N:1V ($(42,40 \pm 1,13)$ мм), численные показатели значительно превышали результаты в контрольных вариантах. Наименьшие значения отмечены в варианте опыта с альгоцианобактериальным комплексом состава 1N:1V ($(32,58 \pm 1,43)$ мм) и при внесении суспензий микроводоросли *Vischeria* ($(32,90 \pm 0,95)$ мм), что свидетельствует о важности оптимального соотношения компонентов в микробных консорциумах для реализации их потенциала.

Исследование количественных характеристик продуктивности колоса ячменя выявило значимые различия между вариантами опыта по числу зерен (рисунок 3). Сравнения средних величин позволили дифференцировать все изучаемые варианты на две гомогенные подгруппы. В первую группу с максимальными значениями вошли положительный контроль BVM ($(31,96 \pm 1,48)$ шт.), вариант опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* в соотношении 2:1 ($(31,49 \pm 1,17)$ шт.) и вариант опыта с комплексом состава 1N:2V ($(29,18 \pm 0,80)$ шт.). Вторую группу с минимальными значениями составили контроль дистиллированной водой ($(25,57 \pm 1,20)$ шт.), варианты опыта с суспензиями цианобактерии рода *Nostoc* и микроводоросли рода *Vischeria* ($(23,71 \pm 0,95)$ и $(24,37 \pm 1,00)$ шт. соответственно) и альгоцианобактериальным комплексом состава 1N:1V ($(23,65 \pm 1,420)$ шт.).

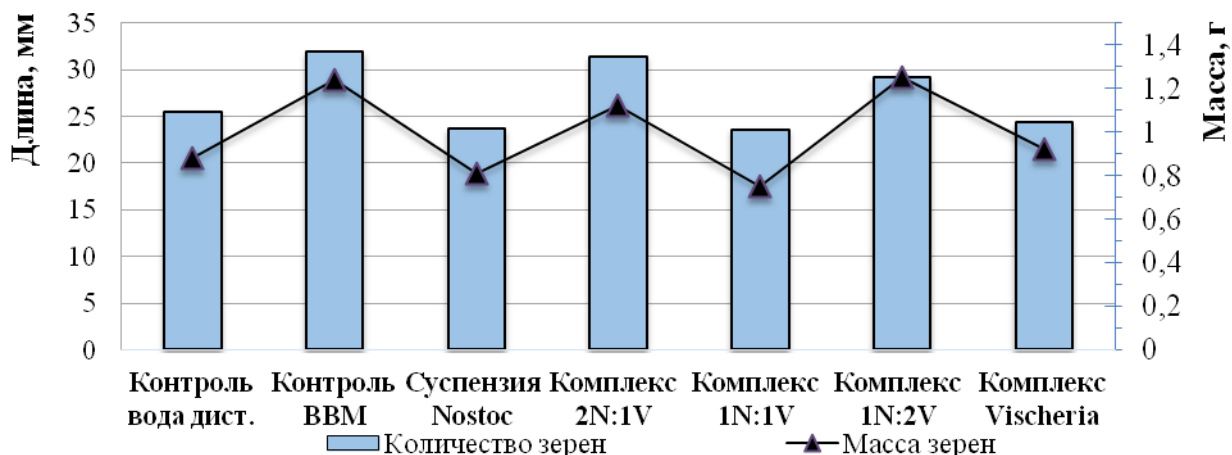


Рисунок 3 – Сравнение продуктивности колоса ячменя

Максимальные показатели массы зерна были зафиксированы в варианте опыта с использованием комплекса *Nostoc-Vischeria* в соотношении 1:2, составившие $(1,25 \pm 0,11)$ г. Данный показатель был несколько ниже в контроле с основной средой Болда ($(1,24 \pm 0,13)$ г), однако превосходил значения в остальных вариантах опыта и в контроле с дистиллированной водой. Высокую эффективность также демонстрировал альгоцианобактериальный комплекс состава 2N:1V ($(1,12 \pm 0,06)$ г).

Наименьшие значения продуктивности отмечены в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:1V ($(0,75 \pm 0,07)$ г) и при обработке посевов суспензией цианобактерии рода *Nostoc* ($(0,81 \pm 0,05)$ г).

Проведенное исследование показало перспективность применения суспензий цианобактерий рода *Nostoc*, микроводорослей рода *Vischeria* и их комплексов в агрофитоценозах на примере озимого ячменя. В ризосфере ячменя отмечено увеличение содержания подвижного калия на 358 млн^{-1} и органического вещества на 0,41 %, а также повышение pH и содержания кальция. В корневой зоне и междурядьях также зафиксировано незначительное увеличение элементов питания. На контрольном участке вне поля за тот же период произошло снижение анализируемых показателей, что свидетельствует о положительной роли инокуляции фототрофных микроорганизмов в поддержании почвенного плодородия. Применение суспензий цианобактерий и микроводорослей способствовало лучшей выживаемости растений в агрофитоценозе. Выявлен выраженный стимулирующий эффект при совместном применении суспензий *Nostoc* и *Vischeria* в соотношениях 2:1 и 1:2, проявляющийся в улучшении морфометрических параметров колоса и увеличения массы зерна.

Литература

1. Кирюшин, В. И. Экологические основы земледелия / В. И. Кирюшин. – М. : Колос, 1996. – 367 с.
2. Лапшин, Ю. А. Методические аспекты создания гетерогенных агрофитоценозов и их роль в повышении продуктивности агроландшафта / Ю. А. Лапшин // Вестник Марийского гос. ун-та. Серия, Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 36–42.
3. Дидович, С. В. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) / С. В. Дидович [и др.] // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 2 (14). – URL: <http://algology.ru/1170> (дата обращения: 01.10.2025).
4. Михеева, Т. М. Перспективы использования культивируемых и планктонных микроскопических водорослей / Т. М. Михеева // Наука и инновации. – 2018. – № 2 (180). – С. 15–19.
5. Югай, М. О. Цианобактерии как объект биотехнологии / М. О. Югай, Н. И. Кордакова // Вестник КазНИТУ. – 2016. – № 4. – С. 304–307.
6. Успенская, В.И. Экология и физиология питания пресноводных водорослей / В. И. Успенская. – М. : МГУ, 1966. – 124 с.
7. Седова, Т. В. Кариология водорослей / Т. В. Седова. – СПб., 1996. – 386 с.
8. Терещенко, Н. Н. Биоудобрения на основе микроорганизмов / Н. Н. Терещенко. – Томск : ТГУ, 2003. – 60 с.
9. Трефилова, Л. В. Использование цианобактерий в агробиотехнологии : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.07 ; 03.00.23 / Трефилова Людмила Васильевна ; Ин-т биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. – Саратов, 2008. – 26 с.
10. Шальго, Н. В. Микроводоросли и цианобактерии как биоудобрение / Н. В. Шальго // Наука и инновации. – 2019. – № 3 (193). – С. 22–26.
11. Chamizo, S. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils : gaining insights for applicability in soil restoration / S. Chamizo [et al.] // Original Research. – 2018. – Vol. 6. – P. 101–114.
12. Role of algae and cyanobacteria insustainable agriculture system / R. Sharma [et al.] // Wudpecker J. Agric. Res. – 2012. – Vol. 1, № 9. – P. 381–388.
13. Доброжан, С. Н. Использование некоторых видов синезеленых азотфиксирующих водорослей в качестве биологического удобрения / С. Н. Доброжан [и др.] // Альгология. – 2014. – Т. 24, № 3. – С. 426–429.
14. Prasanna, R. Cyanobacteria as a «green» option for sustainable agriculture / R. Prasanna [et al.] // Cyanobacteria : An Economic Perspective / Eds.: N. K. Sharma, A. K. Rai, L. J. Stal. – Chichester, West Sussex : Wiley and Sons, 2014. – Ch. 9. – P. 145–166.

15. Paudel, Y. P. Role of blue green algae in rice productivity / Y. P. Paudel [et al.] // *Agriculture and Biology Journal of North America*. – 2012. – Vol. 3, № 8. – P. 332–335.
16. Лукьянов, В. А. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе / В. А. Лукьянов, А. И. Стифеев. – Курск : КГСХА, 2014. – 181 с.
17. Штина, Э. А. Экология почвенных водорослей / Э. А. Штина, М. М. Голлербах. – М., 1976. – 143 с.
18. Зенова, Г. М. Почвенные водоросли и их роль в формировании структуры почвы / Г. М. Зенова, Э. А. Штина // *Почвоведение*. – 1990. – № 10. – С. 104–113.
19. Лукьянов, В. А. Рост и развитие озимой пшеницы с применением культуральной среды от микроводорослей / В. А. Лукьянов, С. Ю. Горбунова, А. И. Стифеев // *Инновации в АПК : проблемы и перспективы*. – 2018. – № 3 (19). – С. 98–103.
20. Батаева, Ю. В. Повышение продуктивности растений защищенного грунта при обработке зелеными микроводорослями и цианобактериями / Ю. В. Батаева, Л. Н. Григорян, А. Д. Батаева // *Экологические системы и приборы*. – 2025. – № 5. – С. 49–54.
21. Гайсина, Л. А. Современные методы выделения и культивирования водорослей : учеб. пособ. / Л. А. Гайсина, А. И. Фазлутдинова, Р. Р. Кабиров. – Уфа : БГПУ, 2008. – 151 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 12.03.2026

Анализ лихенофильной микобиоты представителей родов *Bryoria* и *Usnea* Беларуси

И.М. Болсун

В ходе ревизии лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* Беларуси было выявлено 155 образцов, пораженных лихенофильными грибами. На образцах лишайников рода *Bryoria* найдено 3 вида лихенофильных грибов: *Lichenocodium lecanorae*, *L. usneae* и *Lichenostigma maureri*; на образцах лишайников рода *Usnea* – 8 видов: *Abrothallus usneae*, *Athelia arachnoidea*, *Biatoropsis rubicundae*, *B. usnearum*, *Cylindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum*, *Lichenocodium lecanorae*, *Lichenostigma maureri*. Для отмеченных видов определена видовая селективность при выборе лишайника-хозяина, определены наиболее и наименее часто поражаемые таксоны лишайников, а также выявлены территории Беларуси с наиболее высоким богатством лихенофильной микобиоты.

Ключевые слова: биоразнообразие, лихенофильные грибы, лишайники, распространение, субстрат, экология.

During the revision of lichen genera *Bryoria* and *Usnea* in Belarus, 155 specimens infected with lichenicolous fungi were identified. *Lichenocodium lecanorae*, *L. usneae* and *Lichenostigma maureri* were found on *Bryoria*, and *Abrothallus usneae*, *Athelia arachnoidea*, *Biatoropsis rubicundae*, *B. usnearum*, *Cylindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum*, *Lichenocodium lecanorae*, *Lichenostigma maureri* were identified on *Usnea*. For these fungi, host species selectivity was determined, the most and the least frequently infected lichen taxa were stated, as well as the territories of Belarus with the highest abundance of lichenicolous mycobiota were revealed.

Keywords: biodiversity, lichenicolous fungi, lichens, distribution, substrate, ecology.

Введение. Лихенофильные грибы представляют собой важную экологическую группу видов, которые обитают на лишайниках в качестве паразитов, патогенов широкого спектра действия, сапротрофов или комменсалов [1]. В настоящее время число признанных лихенофильных грибов составляет более 2300 таксонов различных классов отделов Ascomycota и Basidiomycota [2].

В результате исследования лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* Беларуси [3]–[13] было выявлено 155 гербарных образцов лишайников, на слоевищах которых были обнаружены лихенофильные грибы. В связи с этим анализ лихенофильной микобиоты представителей родов *Bryoria* и *Usnea* является актуальной задачей.

Материал и методы исследования. Материалом для данного исследования послужили образцы лишайников родов *Bryoria* и *Usnea*, хранящиеся в гербариях Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины (GSU), Института экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (MSK-L), Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (MSKH), Белорусского государственного университета (MSKU) и Ботанического института имени В.Л. Комарова Российской академии наук (LE). Всего было проанализировано 756 гербарных образцов лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* (207 и 549 образцов, соответственно) сборов 1924–2018 гг. Дублетные сборы, хранящиеся в разных гербариях, принимали за один гербарный образец. Общее количество образцов без учета дублетного материала составило 624 гербарных конверта (162 образца рода *Bryoria* и 462 образца рода *Usnea*).

Результаты и их обсуждение. В результате исследования гербарных образцов лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* было выявлено 3 вида лихенофильных грибов на представителях рода *Bryoria* – *Lichenocodium lecanorae*, *L. usneae* и *Lichenostigma maureri*, и 8 видов на представителях рода *Usnea* – *Abrothallus usneae*, *Athelia arachnoidea*, *Biatoropsis rubicundae*, *B. usnearum*, *Cylindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum*, *Lichenocodium lecanorae*, *Lichenostigma maureri*.

Среди выявленных видов лихенофильных грибов на лишайниках рода *Bryoria* наиболее часто встречается вид *Lichenostigma maureri*, представленный 14 образцами. Виды *Lichenocodium lecanorae* и *L. usneae* встречаются редко и представлены небольшим количеством образцов (2 и 1, соответственно) (рисунок 1).

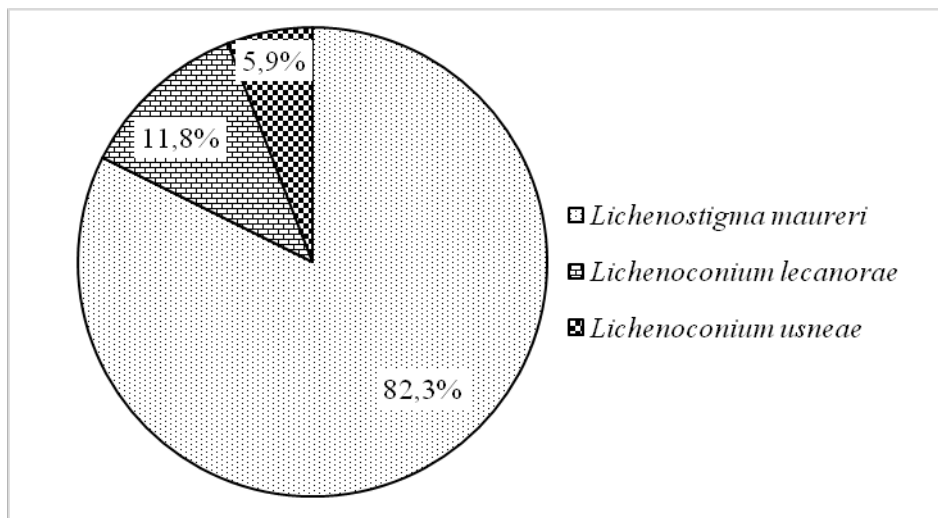


Рисунок 1 – Частота встречаемости лихенофильных грибов на представителях рода *Bryoria*

На лишайниках рода *Usnea* наибольшее количество образцов лихенофильных грибов (115, или 83,3 %) также принадлежат виду *Lichenostigma maureri*. В условиях нашей страны *L. maureri* приурочен к виду *Usnea hirta*, поражает около половины слоевищ данного лишайника. Существенных отличий в субстратной и экологической приуроченностях *L. maureri* по сравнению с таковой лишайников-хозяев не отмечено, за исключением некоторого снижения доли образцов, пораженных лихенофильным грибом, собранных на дубе черешчатом. Наши исследования показали, что *L. maureri* встречается достаточно часто на территории Беларуси, преимущественно в северо-западных регионах страны, что отражает выявленную ранее встречаемость лишайников-хозяев [14]–[15]. Вторым по встречаемости является вид *Biatoropsis usnearum* (16 образцов, или 11,6 %). Вид *Lichenocodium lecanorae* представлен 2 образцами (1,4 %). Остальные виды (*Abrothallus usneae*, *Athelia arachnoidea*, *Biatoropsis rubicundae*, *Cylindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum*) встречаются крайне редко и представлены по 1 образцу (по 0,7 %) каждый (рисунок 2).

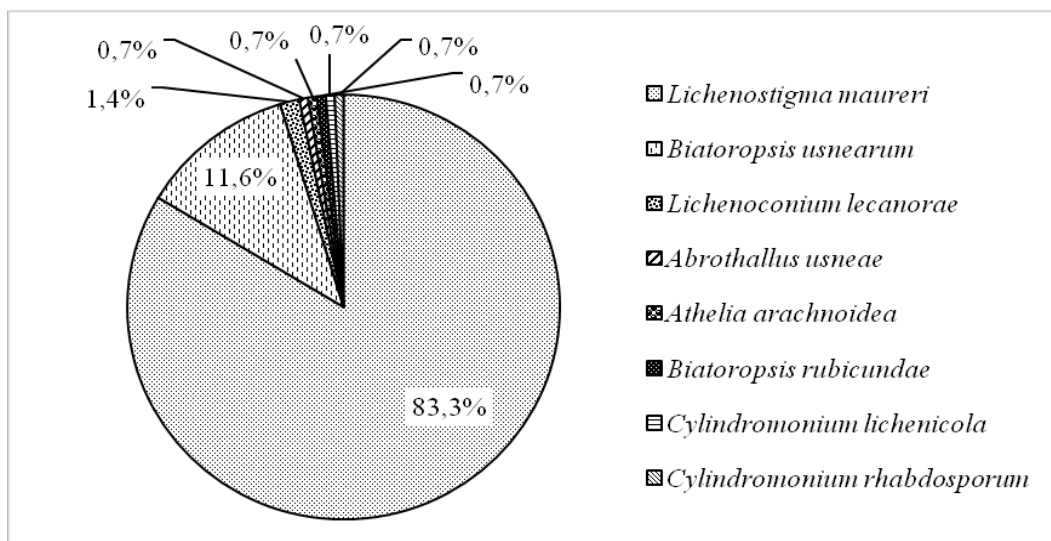


Рисунок 2 – Частота встречаемости лихенофильных грибов на представителях рода *Usnea*

Из всех лишайников рода *Bryoria* наиболее уязвимым к лихенофильным грибам оказался *B. vrangiana*, поражаемый 3 видами лихенофильных грибов: *Lichenocodium lecanorae*, *L. usneae* и *Lichenostigma maureri*. Вторым по разнообразию лихенофильной микобиоты является *B. implexa*. Данный вид лишайника поражен *Lichenocodium lecanorae* и *Lichenostigma maureri*. На *B. capillaris* и *B. nadvornikiana* встречается только один вид лихенофильных грибов – *Lichenostigma maureri* (рисунок 3).

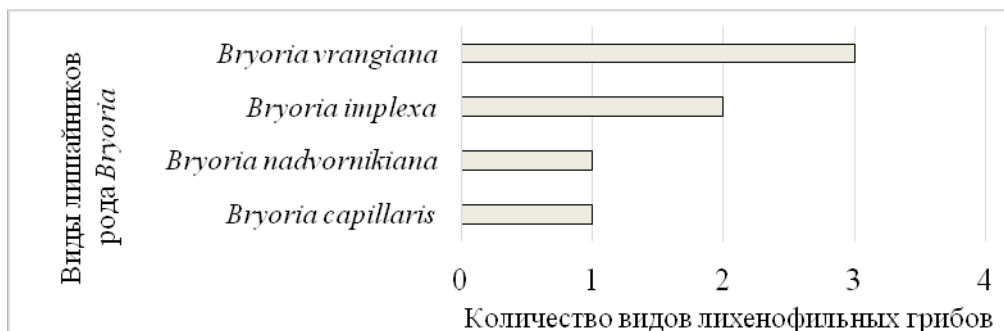


Рисунок 3 – Разнообразие лихенофильной микобиоты представителей лишайников рода *Bryoria*

Среди лишайников рода *Usnea* наиболее высоким богатством лихенофильной микобиоты характеризуется *U. hirta*. На образцах этого вида было найдено 4 вида лихенофильных грибов: *Cylindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum*, *Lichenocodium lecanorae* и *Lichenostigma maureri*. Вторым по разнообразию лихенофильной микобиоты является *U. subfloridana*, на котором было выявлено 3 вида лихенофильных грибов: *Athelia arachnoidea*, *Biatoropsis usnearum* и *Lichenostigma maureri*. Два вида лихенофильных грибов (*Abrothallus usneae* и *Lichenostigma maureri*) было обнаружено на *U. glabrescens* var. *glabrescens*. На *Usnea dasopoga*, *U. glabrescens* var. *fulvoreaegens*, *U. florida*, *U. intermedia*, *U. ceratina* и *U. praetervisa* было найдено по 1 виду лихенофильных грибов. Так на *U. dasopoga* и *U. glabrescens* var. *fulvoreaegens* был выявлен *Lichenostigma maureri*, на *U. florida* и *U. intermedia* – *Biatoropsis usnearum*, на *U. ceratina* – *Biatoropsis rubicundae* и на *U. praetervisa* – *Lichenocodium lecanorae* (рисунок 4).

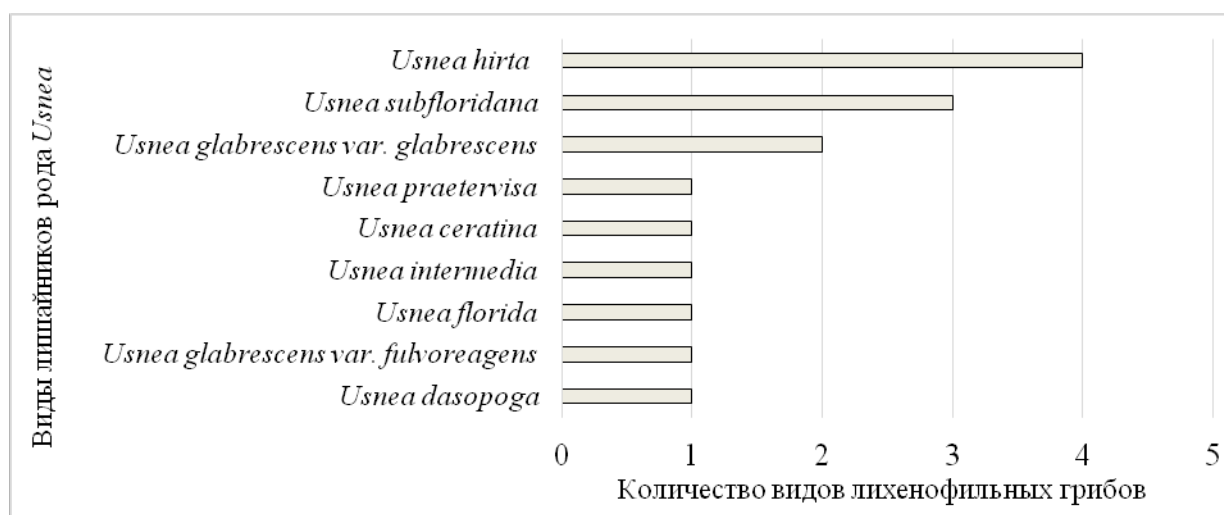


Рисунок 4 – Разнообразие лихенофильной микобиоты представителей лишайников рода *Usnea*

Наибольшую долю пораженных образцов среди представителей рода *Bryoria* имеет *B. capillaris* (3 образца, или 23,1 % от общего числа образцов этого вида лишайников). Все три образца поражены *Lichenostigma maureri*. Вторым по доле пораженных образцов является *Bryoria vrangiana* (8, или 13,1 %, из которых 6 образцов поражены *Lichenostigma maureri* и по 1 образцу – *Lichenocodium lecanorae* и *L. Usneae*). Количество пораженных образцов

Bryoria implexa составляет 3, или 9,4 % (2 образца поражены *Lichenostigma maureri* и 1 – *Lichenocodium lecanorae*) и *Bryoria nadvornikiana* – 3, или 9,1 % (все поражены *Lichenostigma maureri*) (рисунок 5).

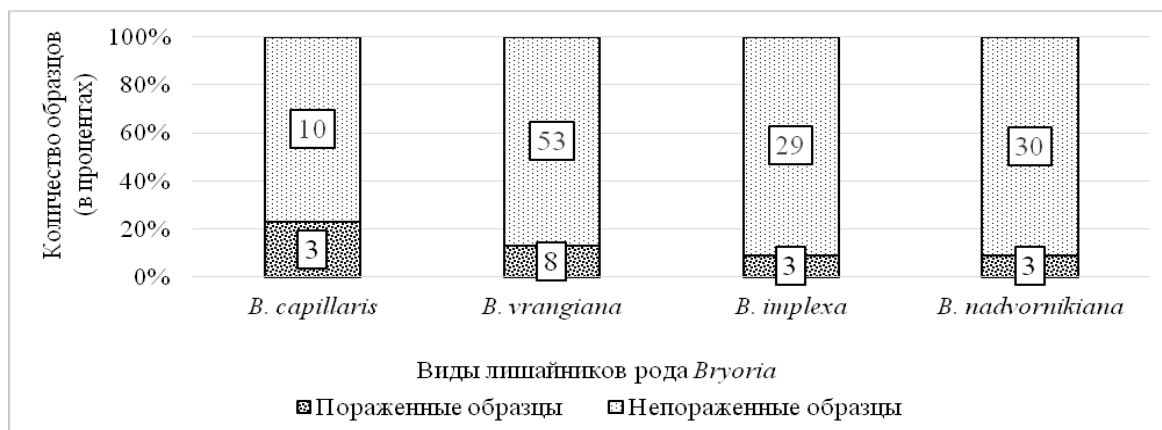


Рисунок 5 – Соотношение пораженных и непораженных лихенофильными грибами образцов лишайников рода *Bryoria*

Среди представителей рода *Usnea* наибольшую долю пораженных образцов имеют *U. praetervisata* – 100,0 % (1 образец поражен *Lichenocodium lecanorae*) и *U. hirta* – 45,7 % (72 образца поражены *Lichenostigma maureri*, по 1 образцу – *Cylindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum* и *Lichenocodium lecanorae*). Следует отметить, что в условиях нашей страны вид *Lichenostigma maureri* приурочен к виду *Usnea hirta*, поражая около половины слоевищ данного лишайника. У видов *Usnea glabrescens* var. *glabrescens* и *U. intermedia* было выявлено 33,3 % пораженных образцов (3 образца *Lichenostigma maureri* и 1 образец *Abrothallus usneae* у *U. glabrescens* var. *glabrescens*, а также 1 образец *Biatoropsis usnearum* у *U. intermedia*). Вид *U. subfloridana* имеет 29,9 % пораженных образцов (*Athelia arachnoidea* – 1 образец, *Biatoropsis usnearum* – 13, *Lichenostigma maureri* – 15). Наименее пораженными видами оказались *U. florida* – 22,2 % (2 образца поражены *Biatoropsis usnearum*), *U. dasopoga* – 18,2 % (22 образца поражены *Lichenostigma maureri*), *U. glabrescens* var. *fulvovireagens* – 15,0 % (3 образца поражены *Lichenostigma maureri*) и *U. ceratina* – 9,1 % (1 образец поражен *Biatoropsis rubicundae*) (рисунок 6).

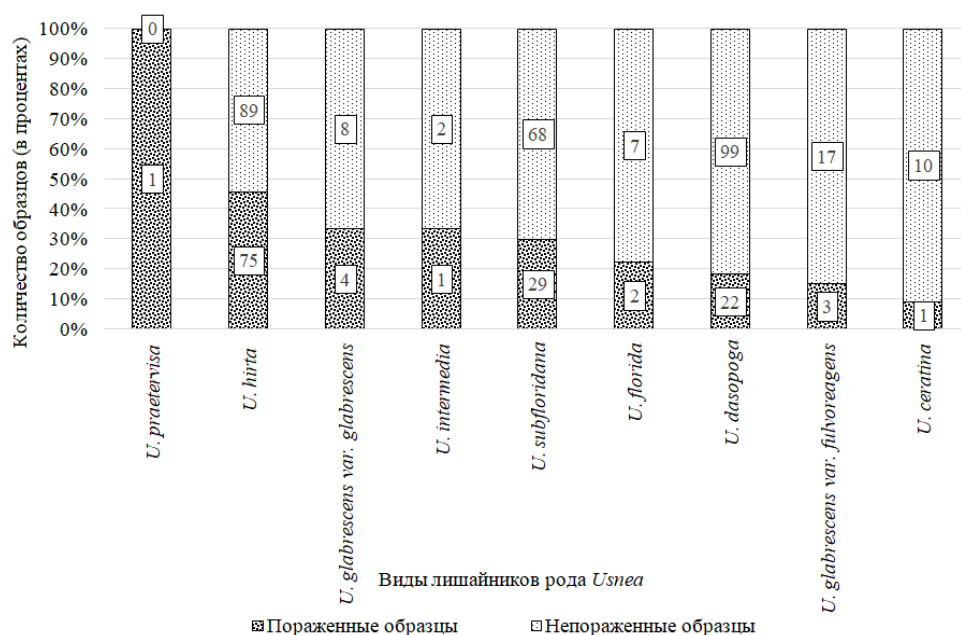


Рисунок 6 – Соотношение пораженных и непораженных лихенофильными грибами образцов лишайников рода *Usnea*

Большое количество пораженных образцов изучаемых родов лишайников (29,4 % для рода *Bryoria* и 57,2 % для рода *Usnea*) произрастали в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) (рисунки 7, 8, 9). Виды *Biatoropsis rubicundae*, *Cylindromonium lichenicola* и *C. rhabdosporum* встречаются только на территории НП «Беловежская пуща».

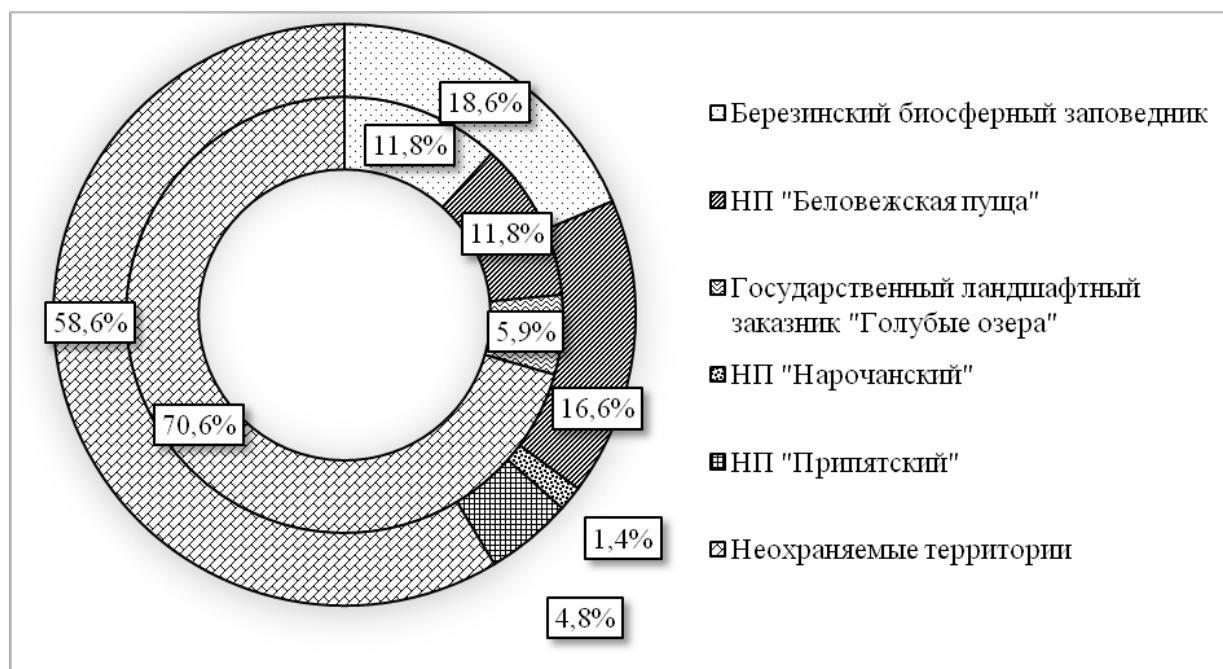


Рисунок 7 – Сравнение приуроченности к ООПТ лишайников рода *Bryoria*, пораженных (внутренний круг) и непораженных (внешний круг) лихенофильными грибами

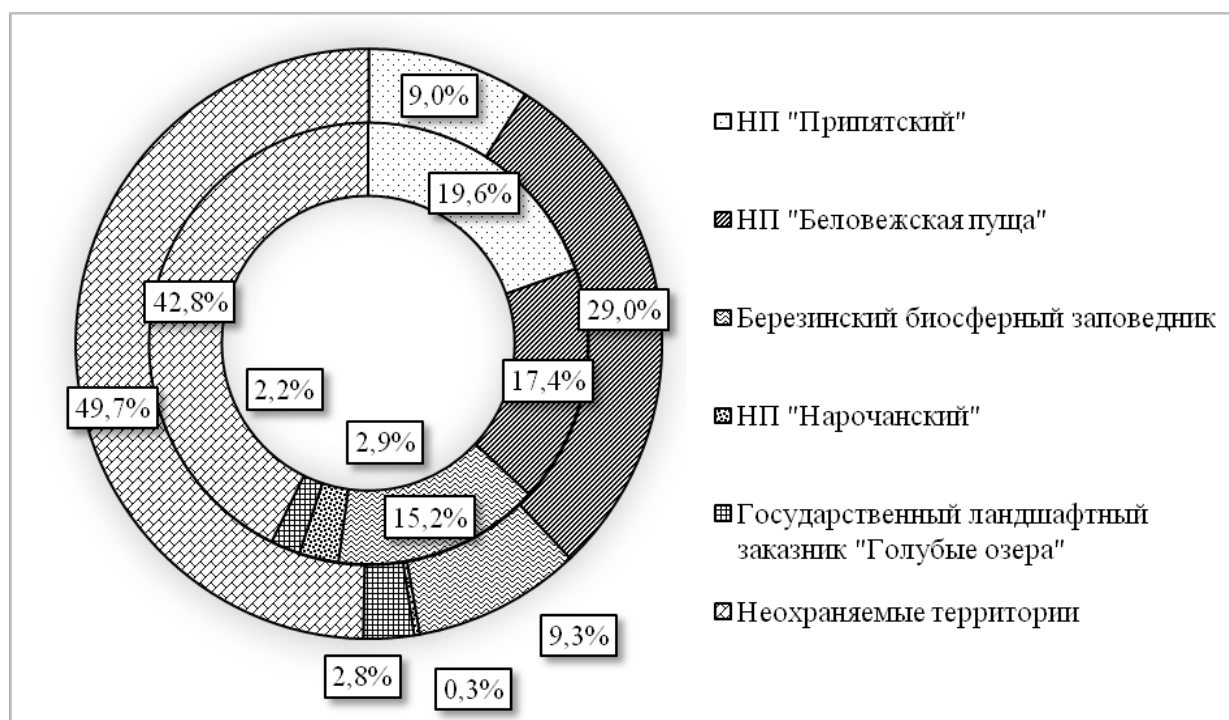


Рисунок 8 – Сравнение приуроченности к ООПТ лишайников рода *Usnea*, пораженных (внутренний круг) и непораженных (внешний круг) лихенофильными грибами

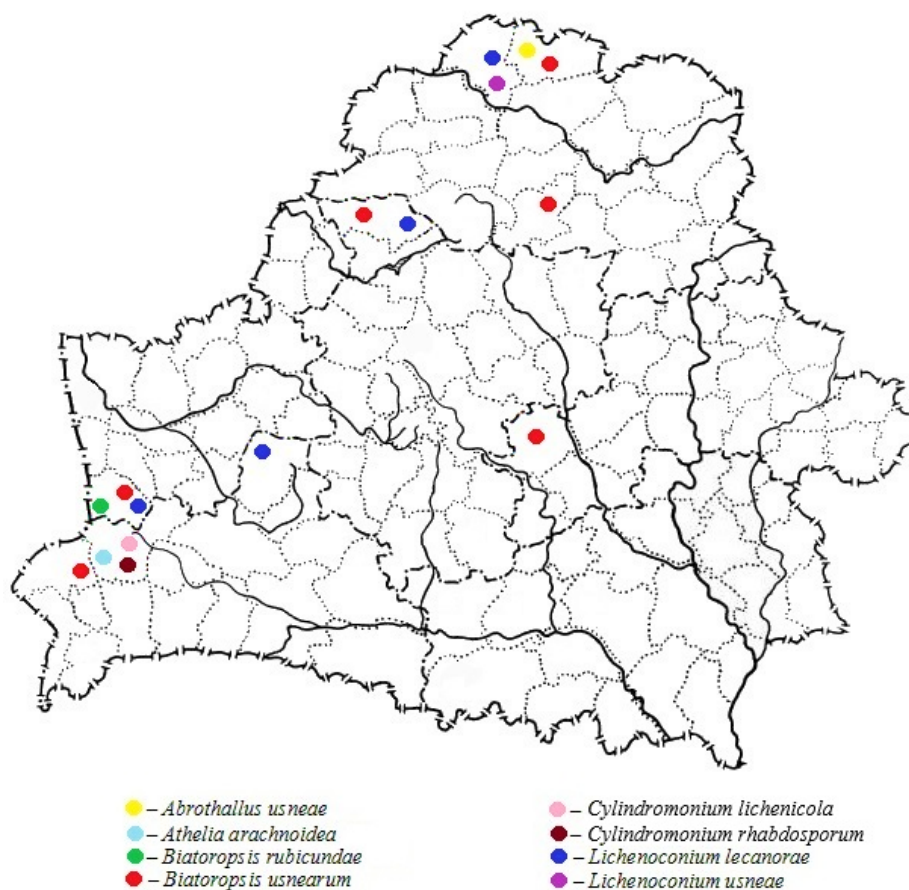


Рисунок 9 – Распространение выявленных лихенофильных грибов (за исключением *Lichenostigma maureri*) на территории Республики Беларусь

Заключение. В результате исследования лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* было выявлено 155 образцов, пораженных лихенофильными грибами. На образцах лишайников рода *Bryoria* было найдено 3 вида лихенофильных грибов: *Lichenocodium lecanorae*, *L. usneae* и *Lichenostigma maureri*; на образцах лишайников рода *Usnea* – 8 видов: *Abrothallus usneae*, *Athelia arachnoidea*, *Biatoropsis rubicundae*, *B. usnearum*, *Cyindromonium lichenicola*, *C. rhabdosporum*, *Lichenocodium lecanorae*, *Lichenostigma maureri*.

Среди выявленных видов лихенофильных грибов на лишайниках родов *Bryoria* и *Usnea* наиболее часто встречается вид *Lichenostigma maureri*. Из лишайников рода *Bryoria* наиболее уязвимым к лихенофильным грибам оказался вид *B. vrangiana*, из лишайников рода *Usnea* – *U. hirta*. Наибольшее количество пораженных образцов выявлено на территории ООПТ. Виды, *Biatoropsis rubicundae*, *Cyindromonium lichenicola* и *C. rhabdosporum* встречались только на территории НП «Беловежская пуща».

Благодарности. Выражаю глубокую благодарность кандидату биологических наук, доценту Владимиру Владимировичу Голубкову (Гродно) и кандидату биологических наук, доценту, ученому секретарю Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси Павлу Николаевичу Белому (Минск) за предоставленные гербарные образцы родов *Bryoria* и *Usnea*.

Литература

1. Lawrey, J. D. Lichenicolous fungi : interactions, evolution, and biodiversity / J. D. Lawrey, P. Diederich // Bryologist. – 2003. – Vol. 106. – P. 80–120.
2. Diederich, P. The 2018 classification and checklist of lichenicolous fungi, with 2000 nonlichenized, obligately lichenicolous taxa / P. Diederich, J. D. Lawrey, D. Ertz // Bryologist. – 2018. – Vol. 121, № 3. – P. 340–425.

3. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. I. *B. capillaris* и *B. nadvornikiana* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый [и др.] // Веснік БрДУ ім. А.С. Пушкіна. Серыя 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2023. – № 2. – С. 61–69.
4. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. II *Bryoria implexa* s. lat. / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый [и др.] // Экспериментальная биология и биотехнология. – 2023. – № 2. – С. 65–80.
5. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. III. *B. furcellata* и *B. fuscescens* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый [и др.] // Веснік ГрДУ ім. Я. Купалы. Серыя 5, Эканоміка. Сацыялогія. Біялогія. – 2023. – Т. 13, № 2 – С. 118–124.
6. Цуриков, А. Г. Лишайники рода *Bryoria* Национального Парка «Припятский» / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый [и др.] // Мониторинг и оценка состояния растительного мира : материалы VI Международной научной конференции, Минск, 9–13 октября 2023 г. / Ин-т экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Б, НИ «Припятский». – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – С. 331–333.
7. Tsurykau, A. The lichen genus *Usnea* (Parmeliaceae, Ascomycota) in Belarus / A. Tsurykau, V. Golubkov, P. Bely [et al.] // Herzogia. – 2024. – Vol. 37, № 2. – P. 270–287.
8. Болсун, И. М. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. I. *Usnea hirta* / И. М. Болсун, А. Г. Цуриков, В. В. Голубков [и др.] // Веснік ГрДУ ім. Я. Купалы. Серыя 5, Эканоміка. Сацыялогія. Біялогія. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 159–167.
9. Болсун, И. М. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. II. *Usnea florida* и *U. subfloridana* / И. М. Болсун, А. Г. Цуриков, В. В. Голубков [и др.] // Веснік МДУ ім. А.А. Куляшова. Серыя В, Прыродазнаўчыя навукі (матэматыка, фізіка, біялогія). – 2024. – № 2 (64). – С. 65–73.
10. Болсун, И. М. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. III. *Usnea ceratina* и *U. wasmuthii* / И. М. Болсун, А. Г. Цуриков, В. В. Голубков [и др.] // Веснік ВДУ. – 2024. – № 4 (125). – С. 25–31.
11. Болсун, И. М. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. IV. *Usnea glabrata*, *U. glabrescens*, *U. praetervisa* / И. М. Болсун, А. Г. Цуриков, В. В. Голубков [и др.] // Веснік БрДУ ім. А.С. Пушкіна. Серыя 5, Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2024. – № 2. – С. 5–14.
12. Болсун, И. М. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. V. *Usnea barbata* и *U. dasopoga* / И. М. Болсун, А. Г. Цуриков, В. В. Голубков [и др.] // Веснік МДПУ ім. І.П. Шамякіна. – 2024. – № 2 (64). – С. 3–9.
13. Болсун, И. М. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. VI. *Usnea cavernosa*, *U. intermedia*, *U. perplexans*, *U. substerilis* / И. М. Болсун, А. Г. Цуриков, В. В. Голубков [и др.] // Весці БДПУ. Серыя 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2024. – № 3 (121). – С. 11–16.
14. Болсун, И. М. Экологическая приуроченность лихенофильного гриба *Lichenostigma maureri* (Lichenostigmatales, Phaeosomycetaceae) в Беларуси / И. М. Болсун // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2024. – № 6. – С. 12–17.
15. Болсун, И. М. Распространение лихенофильного гриба *Lichenostigma maureri* (Lichenostigmatales, Phaeosomycetaceae) в Беларуси / И. М. Болсун // ГГУ им. Ф. Скорины. – 2025. – № 3. – С. 5–10.

Перспективы использования многолетних трав в конструкции зонированных буферных полос для минимизации загрязнения водных экосистем азотом

А.А. БУТЬКО, О.И. РОДЬКИН, В.А. ПАШИНСКИЙ

В статье представлены результаты оценки фитоэкстракционной способности многолетних трав в конструкции буферных полос для минимизации загрязнения водных экосистем азотом. Объектом исследования являются 28 видов монокультур многолетних трав, включенных в Государственный реестр сортов Республики Беларусь в 1998–2024 гг. Результаты исследований позволили полнить иерархический кластерный анализ отдельных видов трав, объединяющих их по уровню биологического выноса азота с надземной фитомассой. Предложен метод балльной оценки фитоэкстракционной способности отдельных видов трав, а также их влияния на потенциал снижения критической нагрузки на водный объект по эвтрофикации.

Ключевые слова: буферная полоса, фитоэкстракция, многолетние травы, азот, кластеризация, балльная оценка, эвтрофикация.

The article presents the results of assessing the phytoextraction capacity of perennial grasses in the design of buffer strips to minimize nitrogen pollution of aquatic ecosystems. The object of the study is 28 species of monocultures of perennial grasses included in the State Register of Varieties of the Republic of Belarus in 1998–2024. The research results made it possible to complete a hierarchical cluster analysis of individual grass species, combining them by the level of biological nitrogen removal with aboveground phytomass. A method for scoring the phytoextraction capacity of individual grass species, as well as their impact on the potential for reducing the critical load on a water body for eutrophication, is proposed.

Keywords: buffer strip, phytoextraction, perennial grasses, nitrogen, clustering, point assessment, eutrophication.

Введение. Актуальность проблемы охраны водных ресурсов в сельском хозяйстве усиливается в современных условиях и в большей степени проявляется при попадании загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты от рассредоточенных источников [1].

Сельскохозяйственные земли являются главным рассредоточенным (диффузным) источником загрязнения поверхностных водных объектов. Поступление загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты в результате внесения и смыва удобрений и химических средств защиты растений ухудшает экологическое состояние поверхностных водных объектов и приводит к заморным явлениям [1].

Одним из ключевых методов по смягчению негативного воздействия химизации сельского хозяйства на деградацию водных экосистем является конструирование и управление прибрежными буферными полосами [2]–[5].

Буферная полоса представляет собой сложную экосистему почвы, растений и микроорганизмов, которая выполняет экологическую функцию, включая синергетические эффекты физических, химических и биохимических реакций естественных экосистем [6].

В основном перехват азота в буферных полосах осуществляется путем седиментации, инфильтрации [7], адсорбции почвой и растениями [8], микробной фиксации [9], а также денитрификации [10]. Однако одним из наиболее существенных механизмов перехвата является поглощение растениями [11]–[12].

Традиционно прибрежные буферные полосы состоят из различных типов растительности, включая отдельные виды или комбинацию деревьев, кустарников, трав и разнотравья [13], которые в значительной мере способны эффективно снижать диффузное загрязнение водных объектов азотом [14]. Многочисленные исследования показали, что эффективность перехвата азота травянистой растительностью составляет от 4 до 70 %, в то время как в комбинированных буферных полосах, состоящих из древесной и травянистой растительности, 75–95 % [15].

В структуре прибрежных буферных полос рекомендуется использовать три отдельные зоны растительности [16]:

– зона 1: неуправляемая полоса из постоянно произрастающей местной древесной и кустарниковой растительности, непосредственно прилегающая к водному объекту для укрепления береговой линии и стабилизации температуры воды;

– зона 2: управляемая полоса из древесной и/или кустарниковой растительности, предназначенной для снижения твердого стока, очистки поверхностных и грунтовых вод от питательных элементов и загрязняющих веществ;

– зона 3: управляемая полоса из травянистой растительности, предназначенная для очистки поверхностных вод от питательных элементов и загрязняющих веществ (пестицидов), снижения твердого стока, а также замедления сконцентрированного поверхностного стока и его распределения по более широкому фронту буферной полосы.

Обеспечение экологической и экономической жизнеспособности прибрежных буферных полос диктует необходимость изучения фитоэкстракционной способности многолетних трав входящих в структуру буферных полос, а также их влияния на снижение уровня эвтрофикации водных объектов.

Материалы и методы исследований. При кластеризации многолетних трав с целью изучения их фитоэкстракционной способности в отношении азота использованы сведения хозяйственно-биологической характеристики сортов, включенных в Государственный реестр сортов Республики Беларусь в 1998–2024 гг. [17].

Многолетние травы представлены 28 видами в количестве 200 сортов из них: бекмания обыкновенная (*Beckmannia eruciformis* (L.) Host) – 1; галега восточная (*Galega orientalis* Lam.) – 3; двукисточник тростниковый (*Phalaris arundinacea* L.) –1; донник белый (*Melilotus albus* Medik.) –2; донник желтый (*Melilotus officinalis* Medik.) – 2; ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) – 7; житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* L.) –1; клевер ползучий (*Trifolium repens* L.) – 15; клевер луговой (красный) (*Trifolium pratense* L.) – 23; кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss) – 1; лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.) – 1; люцерна желтая (*Medicago falcate* L.) – 1; люцерна изменчивая (*Medicago polymorpha* L.) – 7; люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) –34; лядвенец рогатый (*Lotus corniculatus* L.) – 3; мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) – 4; овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.) – 15; овсяница тростниковая (*Festuca arundinacea* Schreb.) – 13; овсяница красная (*Festuca rubra* L.) – 4; райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.) – 30; райграс многоукосный (*Lolium multiflorum* L.) – 6; тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.) –15; фестулолиум (*Festulolium*) – 7; чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.) – 2; эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC.) – 3.

Иерархический кластерный анализ выполнен методом Уорда, расстояния между объектами Евклидово, классификационные признаки: среднее содержание азота в надземной фитомассе трав, их максимальная и среднегодовая биологическая продуктивность за период вегетации.

Оценка потенциального снижения критической нагрузки на водный объект по эвтрофикации растительностью в составе буферных полос выполнена с использованием стехиометрического подхода, при котором устанавливается эквивалентность макропитательных веществ на основе их появления в фитомассе [18].

Статистический и графический анализ результатов исследований выполнен с использованием Statistica v.10.

Результаты и их обсуждение. Среднее содержание азота (рисунок 1) в биологической группе корневищных злаковых трав (*Beckmannia eruciformis* (L.) Host, *Bromus inermis* Leyss, *Phalaris arundinacea* L., *Poa pratensis* L.) составило 21,23 г/кг сух. вещ., варьируя в диапазоне от 19,48 г/кг (мятлик луговой) до 23,84 г/кг (бекмания обыкновенная).

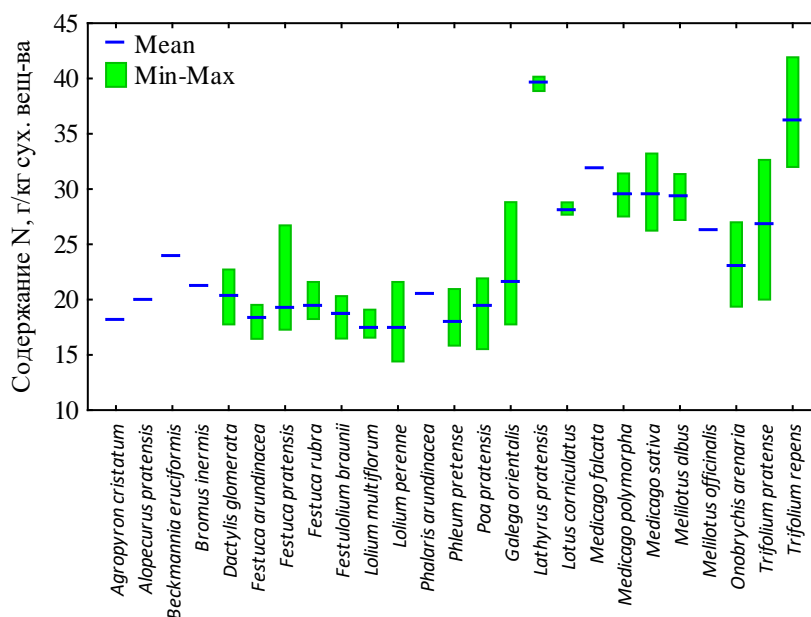


Рисунок 1 – Содержание азота в надземной фитомассе трав

В группе рыхлокустовых злаковых трав (*Agropyron cristatum* L., *Alopecurus pratensis* L., *Dactylis glomerata* L., *Festuca arundinacea* Schreb., *Festuca pratensis* Huds., *Festuca rubra* L., *Lolium perenne* L., *Lolium multiflorum* L., *Festulolium*, *Phleum pretense* L.) среднее содержание азота – 18,68 г/кг; максимальное количество – 20,04 г/кг (ежа сборная), минимальное – 17,34–17,44 г/кг (райграс пастбищный и райграс многоукосный).

В группе стержнекорневых бобовых трав среднее содержание азота существенно выше – 29,22 г/кг; максимальной количество выявлено в фитомассе чины луговой (39,51 г/кг), минимальное – галега восточная (21,50 г/кг). Значительным уровнем содержания азота обладает клевер ползучий (36,19 г/кг), люцерна (30,32 г/кг) и донник белый (29,28 г/кг).

Среднегодовая биологическая продуктивность надземной фитомассы (рисунок 2) корневых злаковых трав составила 91,6 ц/га сухого вещества; рыхлокустовых злаковых трав – 88,7 ц/га; бобовых трав – 94,7 ц/га.

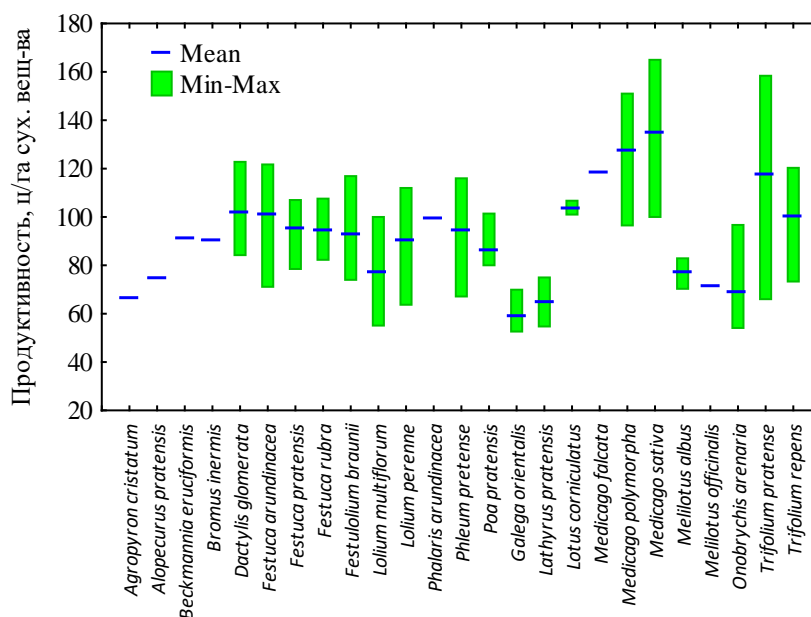


Рисунок 2 – Биологическая продуктивность надземной фитомассы трав

Максимальной продуктивностью среди корневищных злаковых трав обладают двухкосточник тростниковый (98,9 ц/га); рыхлокустовых злаковых трав – ежа сборная (101,4 ц/га) и овсяница тростниковая (100,7 ц/га); бобовых трав – люцерна посевная (134,5 г/кг). Минимальной продуктивностью среди выше обозначенных групп трав обладают мятлик луговой (86,1 ц/га), лисохвост луговой (66,3 ц/га) и галега восточная (59,1 г/кг).

В группе рыхлокустовых злаковых трав в относительно близком диапазоне 92,47–95,44 ц/га располагаются значения продуктивности овсяницы луговой, овсяницы красной, фестулолиума и тимофеевки луговой; среди бобовых трав – люцерна желтая, люцерна изменчивая, лядвенец рогатый и клевер луговой в диапазоне 117,7–127,4 ц/га.

Результаты иерархического кластерного анализа трав (рисунок 3) позволили выделить четыре кластера:

1 кластер – житняк гребенчатый, лисохвост луговой, кострец безостый, двухкосточник тростниковый, донник белый, эспарцет песчаный;

2 кластер – галега восточная, чина луговая, донник желтый;

3 кластер – бекмания обыкновенная, ежа сборная, овсяница тростниковая, овсяница луговая, овсяница красная, фестулолиум, райграс многоукосный, райграс пастбищный, тимофеевка луговая, мятлик луговой, лядвенец рогатый, клевер ползучий;

4 кластер – люцерна желтая, люцерна изменчивая, люцерна посевная, клевер луговой.

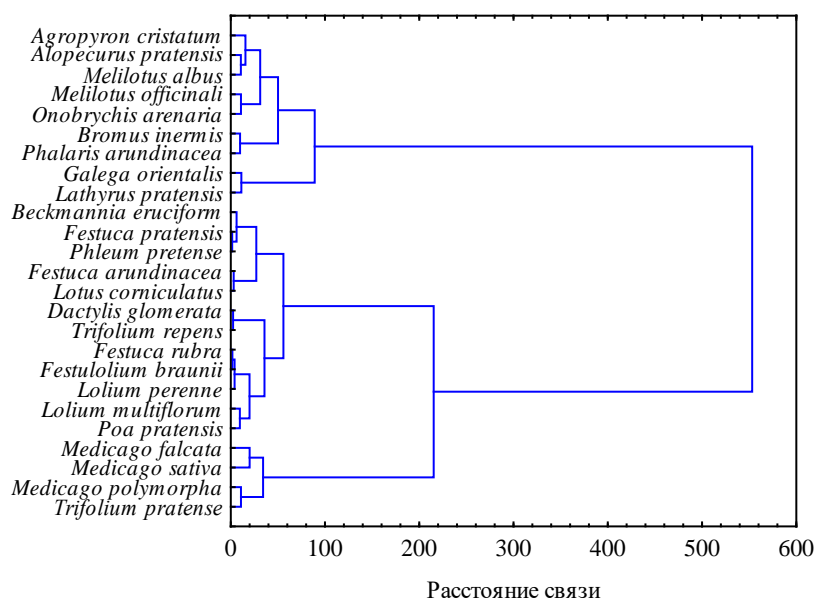


Рисунок 3 – Дендограмма кластеров многолетних трав

В первом кластере биологический вынос азота с надземной фитомассой трав за период вегетации в среднем составил 174,0 кг/га, максимальное – 224,3 кг/га (донник белый); во втором кластере – 189,9 кг/га, максимальное 256,2 кг/га (чина луговая); в третьем кластере – 202,2 кг/га, максимальное 361,8 кг/га (клевер ползучий); в четвертом кластере – 366,2 кг/га, максимальное 397,2 кг/га (люцерна посевная).

Для определения бальной оценки фитоэкстракционной способности трав, используемых в структуре буферных полос, нами предложена формула:

$$B = \sqrt[3]{p \cdot c_N},$$

где B – оценка в баллах; p – среднегодовая биологическая продуктивность надземной фитомассы трав, ц/га сух. вещ.; c_N – содержание азота в надземной фитомассе трав, г/кг сух. вещ. Для перевода в 100 шкалу за 100 баллов принято максимальное произведение p , c_N , которое было получено для люцерны посевной.

Оценочные баллы искусственно созданных ценозов трав: люцерна посевная (100) > люцерна изменчивая (98) > люцерна желтая (98) > клевер ползучий (97) > клевер луговой (93) > лядвенец рогатый (90) > чина луговая (86) > донник белый (83) > бекмания обыкновенная (82) > ежа сборная (81) > двукисточник тростниковый (80) > кострец безостый (78) > донник желтый (78) > овсяница тростниковая (77) > овсяница луговая (77) > овсяница красная (77) > фестулолиум (76) > тимофеевка луговая (75) > мятлик луговой (75) > эспарцет песчаный (73) > райграс пастбищный (73) > житняк гребенчатый (70) > райграс многоукосный (69) > лисохвост луговой (69) > галега восточная (68).

Биологический вынос азота для люцерны посевной варьирует, в среднем составляет 248,6 кг/га (максимальное – 323,5 кг/га (сорт Нутрикс)); люцерна изменчивая – 233,7 (264,9 (сорт СВ3211)); люцерна желтая – 234,8 (сорт Вера); клевер ползучий – 225,6 (265,9 (сорт Тасман)); клевер луговой – 196,9 (256,6 (сорт Атлантис)); лядвенец рогатый – 182,0 (192,1 (сорт Изис)); чина луговая – 159,7 (182,2 (сорт Журавушка)); донник белый – 141,0 (162,5 (сорт Полешук)); бекмания обыкновенная – 135,7 (сорт Жодинская); ежа сборная – 129,5 (174,4 (сорт Горизонт)); двукисточник тростниковый – 126,6 (сорт Изумруд); кострец безостый – 119,3 (сорт Выдатны); донник желтый – 116,5 (сорт Мядовы); овсяница тростниковая – 115,8 (138,7 (сорт Кора)); овсяница луговая – 113,3 (128,9 (сорт Кайда ДС)); овсяница красная – 113,3 (161,0 (сорт Космонавт)); овсяница красная – 113,3 (122,7 (сорт Кондор, Гондолин)); фестулолиум – 106,8 (136,8 (сорт Лофа)); тимофеевка луговая – 106,3 (128,7 (сорт Промессе)); мятлик луговой – 103,5 (112,8 (сорт Лато)); эспарцет песчаный – 101,8 (163,1 (сорт Зидди)); райграс пастбищный – 97,9 (134,3 (сорт Эксплоужен)); житняк гребенчатый – 85,1 (сорт Маларыцкі); райграс многоукосный – 82,8 (107,4 (сорт Хантер)); лисохвост луговой – 82,9 (сорт Криничный); галега восточная – 81,8 (125,9 кг/га (сорт БГСХА-2)).

Необходимо отметить, что отдельные сорта злаковых трав превосходят либо сопоставимы с уровнем биологического выноса азота бобовыми травами, например, сорт Горизонт (*Dactylis glomerata*) соответствует сорту Галакси, Фравер, Мадалина (*Medicago sativa*), ГПТТ-ранний, ТОС – 870, Ранний 2 (*Trifolium pratense*), Изумруд, Раковский (*Lotus corniculatus*), Журавушка (*Lathyrus pratensis*), а сорт Космонавт (*Festuca pratensis*) превосходит сорт Мерея, Долина, Устойливы, Янтарный, Гармония (*Trifolium pratense*), Купава (*Lathyrus pratensis*), БГСХА-2 (*Galega orientalis*), Коптевский (*Melilotus albus*), Мядовы (*Melilotus officinalis*).

Данное обстоятельство необходимо учитывать при сопоставлении отдельных сортов злаковых трав, среди которых также отсутствуют статистически значимые отличия в биологическом выносе азота. В качестве примера к таким сортам можно отнести сорт Сигма, Гондолин, Кондор (*Festuca rubra*), Фиола, Космолит, Балтас, Шветра (*Festuca pratensis*), Каролина, Таямница, Липальма Ростук (*Festuca arundinacea*), Каратос, Сторм (*Lolium perenne*), Престо, Барфлео, Радде, Аскел (*Phleum pratense*), Лифема, Галубоўскі (*Festulolium braunii*), Трерано, Револин (*Dactylis glomerata*), Выдатны (*Bromus inermis*), Лато (*Poa pratensis*), в которых диапазон выноса азота варьирует в диапазоне 111,1–122,8 кг/га.

Используя выше представленные результаты фитоэкстракционной способности трав в отношении азота, а также стехиометрический подход, установлены показатели удельного потенциала снижения критической нагрузки на водные объекты по эвтрофикации (таблица 1).

Таблица 1 – Удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации монокультурами трав, экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$

Вид трав	n	\bar{X}	σ	Me	Min	Max	C_v
Бекмания обыкновенная	1	0,00575	–	–	–	–	–
Галега восточная	3	0,00347	0,00162	0,00257	0,00250	0,00533	46,6
Двукисточник тростниковый	1	0,00536	–	–	–	–	–
Донник белый	2	0,00598	0,00129	0,00598	0,00506	0,00689	21,6
Донник желтый	1	0,00494	–	–	–	–	–
Ежа сборная	7	0,00549	0,00094	0,00549	0,00441	0,00739	17,2
Житняк гребенчатый	1	0,00361	–	–	–	–	–
Клевер луговой	23	0,00834	0,00186	0,00911	0,00455	1,087	22,3

Окончание таблицы 1

Клевер ползучий	15	0,00956	0,00109	0,00970	0,00677	1,127	11,3
Кострец безостый	1	0,00506	–	–	–	–	–
Лисохвост луговой	1	0,00351	–	–	–	–	–
Люцерна желтая	1	0,00995	–	–	–	–	–
Люцерна изменчивая	7	0,00990	0,00127	0,00998	0,00782	0,01123	12,8
Люцерна посевная	34	0,01054	0,00161	0,01105	0,00737	0,01379	15,3
Лядвенец рогатый	3	0,00771	0,00038	0,00759	0,00740	0,00814	4,9
Мятлик луговой	4	0,00439	0,00027	0,00430	0,00417	0,00478	6,1
Овсяница тростниковая	13	0,00491	0,00087	0,00494	0,00339	0,00588	17,7
Овсяница луговая	15	0,00480	0,00066	0,00454	0,00413	0,00682	13,8
Овсяница красная	4	0,00481	0,00051	0,00495	0,00412	0,00520	10,7
Райграс многоукосный	6	0,00351	0,00088	0,00356	0,00245	0,00455	25,2
Райграс пастбищный	30	0,00415	0,00078	0,00402	0,00290	0,00569	18,9
Тимофеевка луговая	15	0,00451	0,00090	0,00487	0,00299	0,00596	20,0
Фестулолиум	7	0,00453	0,00069	0,00440	0,00374	0,00580	15,2
Чина луговая	2	0,00677	0,00134	0,00677	0,00582	0,00772	19,9
Эспарцет песчаный	3	0,00432	0,00226	0,00321	0,00283	0,00691	52,3

Примечание: n – количество сортов, \bar{X} – среднее арифметическое, σ – среднеквадратическое отклонение, Me – медиана; Min – минимальное, Max – максимальное, c_v – коэффициент вариации.

Средний удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации травами, входящими в состав первого кластера, составил $0,00472 \cdot \text{экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$; второго кластера – $0,00481 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$, третьего кластера – $0,00523 \cdot \text{экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$; четвертого кластера – $0,00968 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$.

Среди бобовых трав значительным потенциалом снижения критической нагрузки обладают люцерна ($0,00737$ – $0,01379 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) и клевер ползучий ($0,00677$ – $0,01127 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$). Наиболее перспективными в использовании являются сорта люцерны посевной – Нутрикс, Паола, СВ4412У, ЛС 02АР и клевера ползучего – Тасман, Лифлекс, Судувяй, Лирепа.

Наиболее перспективными злаковыми травами являются ежа сборная – сорт Горизонт, Интенсив, Пасадо ($0,00617 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$); овсяница тростниковая – сорт Кора, Эсселла, Баролекс ($0,00577 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$); овсяница луговая – сорт Космонавт, Кайта ДС, Шветра, Балтас ($0,00559 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$); райграс пастбищный – сорт Эксплоужен, Овамбо 1, Валерио, Елена ($0,00558 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$); тимофеевка луговая – сорт Промессе, Виннетоу, Динамит ($0,00555 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$); фестулолиум – сорт Лофа, Галубоўскі ($0,00532 \text{ экв. кг PO}_4^{3-}/\text{м}^2$).

Заключение. Обобщая выше представленные результаты исследований констатируем, что фитоэкстракционная способность бобовых трав в отношении азота в среднем на 37,9 % выше по отношению к злаковым травам. Среди бобовых трав наиболее значимым биологическим накоплением азота обладают люцерна, клевер, лядвенец рогатый; среди злаковых трав – бекмания обыкновенная, двукисточник тростниковый и ежа сборная. Необходимо отметить, что отдельные сорта злаковых трав превосходят либо сопоставимы с уровнем биологического выноса азота бобовыми травами.

Оценочные баллы искусственно созданных ценозов монокультур трав, а также значения их удельного потенциала снижения критической нагрузки по эвтрофикации могут быть востребованы при конструировании буферных полос.

Литература

1. Национальная стратегия управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 22 фев. 2022 г. № 91 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 09.01.2025).
2. Бутько, А. А. Продукционные характеристики *Salix alba* и ее фитоэкстракционная способность в отношении азота и фосфора / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Веснік БрУ. Серыя 5, Біялогія. – 2023. – № 2. – С. 8–18.

3. Fate of nitrogen from agriculture in the southeastern Coastal Plain / R. K. Hubbard [et al.] // *J. of Soil a. Water Conservation*. – 2004. – Vol. 59, iss. 2. – P. 72–86
4. Nitrogen removal by riparian buffers along a European climatic gradient : Patterns and factors of variation / S. Sabater [et al.] // *Ecosystems*. – 2003. – Vol. 6. – P. 20–30.
5. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams / J. Turunen [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 649, iss. 1. – P. 495–503.
6. Mitsch, W. J. Nitrogen and phosphorus retention in wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems / W. J. Mitsch, A. J. Horne, R. W. Nairn // *Ecol. Eng.* – 2000. – Vol. 14, iss. 3. – P. 1–7.
7. Denitrification controls in urban riparian soils : implications for reducing urban nonpoint source nitrogen pollution / Y. Li [et al.] // *Environmental Science a. Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21, iss. 17. – P. 10174–10185.
8. Mander, Ü. Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds / Ü. Mander, Y. Hayakawa, V. Kuusemets // *Ecol. Eng.* – 2005. – Vol. 5, iss. 5. – P. 421–432.
9. Hill, A. R. Nitrate removal in stream riparian zones / A. R. Hill // *J. of Environmental Quality*. – 1996. – Vol. 25, iss. 4. – P. 743–755.
10. Groffman, P. M. Nitrate dynamics in riparian forests : microbial studies / P. M. Groffman, A. J. Gold, R. C. Simmon // *J. of Environmental Quality*. – 1992. – Vol. 21, iss. 4. – P. 666– 671.
11. In-situ bioremediation is a viable option for denitrification of chalk groundwaters / J. A. Tompkins // *Quarterly J. of Engineering Geology a. Hydrogeology*. – 2001. – Vol. 34, iss. 1. – P. 111–125.
12. Water quality in the upper Han River basin, China : the impacts of land use/land cover in riparian buffer zone / S. Li [et al.] // *J. of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 165, iss. 1–3. – P. 317–324.
13. Riparian forest buffers in agroecosystems – lessons learned from the Bear Creek Watershed, central Iowa, USA / Schultz [et al.] // *Agroforestry Systems*. – 2004. – Vol. 61, iss. 2. – P. 35–50.
14. Wu, J. Q. Removal of N, P from seepage and runoff by different vegetated and slope buffer strips./ J. Q. Wu, L. J. Xiong, C. Y. Sha // *Water Science a. Technology*. – 2020. – Vol. 82, iss. 2. – P. 351–363.
15. Riparian buffer zones : functions and recommended widths / E. Hawes, M. Smith. – Yale : Yale School of Forestry a. Environmental Studies, 2005. – 15 p.
16. Correll, D. L. Principles of planning and establishment of buffer zones / D. L. Correll // *Ecol. Eng.* – 2005. – Vol. 24, iss. 5. – P. 433–439.
18. Сорта, включенные в Государственный реестр – основа высоких урожаев // Государственное учреждение «Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений». – URL : <http://sorttest.by/descriptionVarieties.php/> (дата обращения: 15.01.2025).
19. Environmental life cycle assessment of products : guide and backgrounds (Part 1) / R. Heijungs, J. Guinée, G. Huppes [et al.]. – Leiden : Centrum voor Milieukunde, 1992. – P. 96.

«Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

Поступила в редакцию 28.11.2025

Ревизия лишенологического гербария Национального парка «Припятский»

В.П. ВЕТЛИНА, А.Г. ЦУРИКОВ

Проведена ревизия 102 образцов лишайников гербария НП «Припятский» сборов 1972–1996 гг. Цель работы – актуализация видового состава лишенологической коллекции с применением современных методов хемотаксономии. С помощью метода тонкослойной хроматографии определено 18 видов лишайников, относящихся к 3 родам (*Baeomyces*, *Cladonia* и *Peltigera*) и 3 семействам (*Baeomycetaceae*, *Cladoniaceae* и *Peltigeraceae*), выявлено соотношение хемотипов химически варьируемых видов (*C. arbuscula*, *C. mitis*, *C. rei*). Результаты позволили привести данные коллекции в соответствие с современными видовыми концепциями таксонов.

Ключевые слова: лишенобиота, *Cladonia*, тонкослойная хроматография, хемотипы, вторичные метаболиты.

A revision of 102 lichen specimens collected between 1972–1996 and stored in Pripyatsky National Park herbarium was carried out. The study aims to update the species composition of the mentioned herbarium collection using modern chemotaxonomic methods. Eighteen lichen species belonging to 3 genera (*Baeomyces*, *Cladonia* and *Peltigera*) and 3 families (*Baeomycetaceae*, *Cladoniaceae* and *Peltigeraceae*) were identified using thin-layer chromatography. The ratio of chemotypes within chemically variable species, *C. arbuscula*, *C. mitis*, and *C. rei*, was determined. The findings facilitated the alignment of the collection data with contemporary taxonomic concepts of species.

Keywords: lichen biota, *Cladonia*, thin-layer chromatography, chemotypes, secondary metabolites.

Введение. Национальный парк «Припятский» был основан в 1969 г. (до реорганизации в 1996 г. – Припятский государственный ландшафтно-гидрологический заповедник). Систематическое изучение лишенобиоты данной территории было начато в 1970 г. сотрудниками Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины [1]. Значительный вклад в сбор фактического материала в этот период внесли О.П. Шахрай и Т.Н. Клакоцкая. Обширный полевой материал, собранный О.П. Шахрай, позволил планомерно изучить видовое разнообразие лишайников и зафиксировать состояние лишенобиоты парка [2], [3].

В настоящее время основная часть сборов лишайников, собранных на территории НП «Припятский», хранится в гербарии Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины [1], однако за период 1972–1996 гг. была сформирована также собственная гербарная коллекция лишайников национального парка, насчитывающая более 100 гербарных конвертов. Несмотря на то, что часть образцов данной коллекции была определена В.В. Голубковым и впоследствии учтена при составлении фундаментальной монографии «Лишенобиота Национального парка “Припятский”» [4], большая ее часть до настоящего времени оставалась неидентифицированной. Кроме того, при определении материала традиционно учитывались только морфологические признаки и точечные капельные реакции, что в ряде случаев является недостаточно достоверным в рамках современных видовых концепций [5]–[9]. В связи с вышеизложенным ревизия данной гербарной коллекции с использованием современных аналитических подходов представляется актуальной задачей.

Материал и методы исследования. Материалом для данного исследования послужили образцы лишайников, хранящиеся в гербарии Национального парка «Припятский». Определение образцов проводили в лабораториях кафедры биологии Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. Морфологию образцов изучали с помощью стереомикроскопа Nikon SMZ-745, а состав вторичных метаболитов – методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) в системе растворителей С [10].

Для этого фрагмент слоевища лишайника помещали в микроцентрифужную пробирку объемом 1,5 мл. Экстракцию вторичных метаболитов проводили ацетоном в течение 1 ч. После этого 30 мкл экстракта наносили на пластины для тонкослойной хроматографии со стандартным силикагелем и ультрафиолетовым индикатором Macherey-Nagel Alugram Sil G UV254 и Merck TLC Silica gel 60 F254 Aluminum sheets. Элюирование пластины до оптимальной дли-

ны продвижения фронта (12 см) проводили в течение 40 мин. Визуализацию разделяемых веществ смеси осуществляли под ультрафиолетовым излучением с длинами волн 254 и 366 нм, а также химическим методом путем обработки пластины 10 %-м раствором серной кислоты (H₂SO₄) и последующим нагреванием пластины в сушильном шкафу до температуры 110 °С в течение 10 мин. В качестве контроля использовали лишайники *Platismatia glauca* (L.) W.L. Culb. & C.F. Culb. и *Pleurosticta acetabulum* (Neck.) Elix & Lumbsch, содержащие атранорин, норстиктовую и каператовую кислоты.

Результаты и их обсуждение. В ходе критической ревизии гербарной коллекции лишайников ГПУ НП «Припятский» было проведено определение 102 гербарных образцов. В результате проведенного исследования было выявлено 18 видов лишайников, относящихся к 3 родам (*Baeomyces*, *Cladonia* и *Peltigera*) и 3 семействам (*Baeomycetaceae*, *Cladoniaceae* и *Peltigeraceae*). Ниже приводим список видов лишайников.

1. *Baeomyces rufus* (Huds.) Rebert.
2. *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot.
3. *Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng.
4. *Cladonia crispata* (Ach.) Flot.
5. *Cladonia fimbriata* (L.) Fr.
6. *Cladonia furcata* (Huds.) Schrad.
7. *Cladonia gracilis* (L.) Willd.
8. *Cladonia macilenta* Hoffm.
9. *Cladonia mitis* (Sandst.) Hale & W.L. Culb.
10. *Cladonia phyllophora* Hoffm.
11. *Cladonia pyxidata* (L.) Hoffm.
12. *Cladonia rangiferina* (L.) F.H. Wigg.
13. *Cladonia rei* Schaer.
14. *Cladonia squamosa* (Scop.) Hoffm.
15. *Cladonia subulata* (L.) Weber ex F.H. Wigg.
16. *Cladonia uncialis* (L.) F.H. Wigg.
17. *Cladonia verticillata* (Hoffm.) Schaer.
18. *Peltigera malacea* (Ach.) Funck

При проведении ТСХ особое внимание было уделено видам, являющимся химически переменными. В исследуемой коллекции для трех видов рода *Cladonia* было зафиксировано наличие нескольких хемотипов, при этом их распределение в выборке неравномерно. Ниже приводим перечень выявленных видов лишайников в алфавитном порядке, список исследованных образцов, а также информацию о химической переменности отдельных таксонов для территории национального парка.

Baeomyces rufus (Huds.) Rebert.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 76, сосняк орляково-мшистый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 06.10.1980.

Cladonia arbuscula (Wallr.) Flot.

По данным [11] известно три хемотипа данного лишайника: I – образцы содержат усниновую и фумарпротоцеттаровую кислоты, II – образцы содержат только усниновую кислоту, фумарпротоцеттаровая кислота отсутствует и III – образцы содержат усниновую и псоромовую кислоты. В гербарии Национального парка «Припятский» выявлено только два из трех известных хемотипов – хемотип I (5 образцов, или 41,7 %), а хемотип II (7; 58,3 %). Хемотип III с псоромовой и усниновой кислотами в исследованном материале не обнаружен.

Хемотип I (усниновая и фумарпротоцеттаровая кислоты). **Лельчицкий район**, Млынокское лесничество, квартал 109, сосновый молодняк, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 585, выдел 17, 2,5 км восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О.П. Шахрай, 18.04.1990; **Житковичский район**, Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк вересково-лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 28.04.1972; Рычевское лесничество, квартал 40, сосняк вересковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 10.07.1973.

Хемотип II (усниновая кислота). **Лельчицкий район**, Млынокское лесничество, квартал 109, сосновый молодняк, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 110, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 03.06.1975; Млынокское лесничество, квартал 605, 2,3 км восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О.П. Шахрай, 09.10.1990; Слободское лесничество, квартал 55, бор-беломошник, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 28.04.1972.

Cladonia coniocraea (Flörke) Spreng.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 565, выдел 38, 2,8 км северо-восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О. П. Шахрай, 15.08.1990.

Cladonia crispata (Ach.) Flot.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 605, 2,3 км восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О.П. Шахрай, 09.10.1990; Млынокское лесничество, квартал 559, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 02.11.1982.

Cladonia fimbriata (L.) Fr.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 565, выдел 38, 2,8 км восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О.П. Шахрай, 15.08.1990.

Cladonia furcata (Huds.) Schrad.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 117, березняк лишайниково-вересковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 18.08.1980; **Житковичский район**, Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 16.05.1974.

Cladonia gracilis (L.) Willd.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 605, 2,3 км восточнее д. Симоновичский Млынок, О.П. Шахрай, 09.09.1990; Млынокское лесничество, квартал 109, сосновый молодняк, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 559, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 02.11.1982; Млынокское лесничество, квартал 621, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 10.11.1982; **Житковичский район**, Озеранское лесничество, квартал 57, сосняк орляково-мшистый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 15.10.1980; Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 16.05.1974.

Cladonia macilenta Hoffm.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 565, выдел 38, 2,8 км северо-восточнее д. Симоновичский Млынок, на коре, О.П. Шахрай, 15.08.1990.

Cladonia mitis (Sandst.) Hale & W.L. Culb.

По данным [11] известно два хемотипа для данного лишайника: I – образцы содержат усниновую и рангиформовую кислоты, II – образцы содержат только усниновую кислоту, рангиформовая кислота отсутствует. В гербарии национального парка выявлены оба хемотипа. Преобладающим является хемотип I (27 образцов, или 87,1 %). Хемотип II представлен 4 образцами (12,9 %).

Хемотип I (усниновая и рангиформовая кислоты). **Лельчицкий район**, Млынокское лесничество, квартал 109, сосновый молодняк, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 110, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 03.06.1975; Млынокское лесничество, квартал 117, березняк лишайниково-вересковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 18.08.1986; Млынокское лесничество, квартал 559, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 02.11.1982; Млынокское лесничество, квартал 560, на почве, О.П. Шахрай, 21.07.1987; Млынокское лесничество, квартал 565, выдел 38, 2,8 км восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О.П. Шахрай, 15.08.1990; Млынокское лесничество, квартал 621, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 10.11.1982; Слободское лесничество, квартал 55, бор-беломошник, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 28.04.1972; **Житковичский район**, Озеранское лесничество, квартал 57, сосняк орляково-мшистый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 15.10.1980; Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк вересково-лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 28.04.1972.

Хемотип II (усниновая кислота). **Лельчицкий район**, Млынокское лесничество, квартал 559, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 02.11.1982; **Житковичский район**, Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 28.04.1972.

Cladonia phyllophora Hoffm.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 605, 2,3 км восточнее д. Симоновичский Млынок, О.П. Шахрай, 09.10.1990; Млынокское лесничество, квартал 109, сосняк молодой, на почве, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 110, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 03.06.1975; Млынокское лесничество, квартал 559, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 02.11.1982.

Cladonia pyxidata (L.) Hoffm.

К сожалению, этикетка для данного образца отсутствует.

Cladonia rangiferina (L.) F.H. Wigg.

Житковичский район, Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк лишайниковый, на почве, Т. Н. Клакоцкая, 16.05.1974.

Cladonia rei Schaer.

В соответствии с данными [11] для данного лишайника выделяют два хемотипа: I – образцы содержат хомосекикаевую и фумарпротоцетраровую кислоты, II – образцы содержат хомосекикаевую кислоту. В гербарии Национального парка «Припятский» выявлен только один из двух известных хемотипов – хемотип I.

Хемотип I (хомосекикаевая и фумарпротоцетраровая кислоты). **Лельчицкий район**, Млынокское лесничество, квартал 565, выдел 38, 3 км восточнее д. Симоновичский Млынок, на почве, О.П. Шахрай, 18.07.1989.

Cladonia squamosa (Scop.) Hoffm.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 605, 2,3 км восточнее д. Симоновичский Млынок, О.П. Шахрай, 09.09.1990; Млынокское лесничество, квартал 106, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 31.03.1982; Млынокское лесничество, квартал 109, сосновый молодняк, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 117, березняк лишайниково-вересковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 18.08.1980; Млынокское лесничество, квартал 559, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 02.11.1982; **Житковичский район**, Озеранское лесничество, квартал 57, сосняк орляково-мшистый, Т.Н. Клакоцкая, 15.05.1980.

Cladonia subulata (L.) Weber ex F.H. Wigg.

К сожалению, этикетка для данного образца отсутствует.

Cladonia uncialis (L.) F.H. Wigg.

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 109, сосновый молодняк, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 2, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 03.02.1975; Млынокское лесничество, квартал 621, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 10.11.1982.

Cladonia verticillata (Hoffm.) Schaer.

Житковичский район, Озеранское лесничество, квартал 60, сосняк лишайниковый, Т.Н. Клакоцкая, 16.05.1974.

Peltigera malacea (Ach.) Funck

Лельчицкий район, Млынокское лесничество, квартал 109, сосняк молодой, на почве, 24.09.1981; Млынокское лесничество, квартал 110, сосняк лишайниковый, на почве, Т.Н. Клакоцкая, 03.06.1975.

Заключение. В ходе ревизии 102 образцов лишайников из коллекции НП «Припятский», собранных с 1972 по 1996 гг., было выявлено 18 видов, почти все из которых (16 видов) относятся к роду Кладония (*Cladonia*).

Использование метода тонкослойной хроматографии (ТСХ) позволило точно идентифицировать виды, имеющие схожие морфологические признаки. Исследование показало, что традиционных методов диагностики недостаточно (в частности, определение по морфологии и капельные химические реакции) для достоверного определения. ТСХ-анализ помог разграничить часть образцов *C. mitis*, *C. arbuscula* и *C. rangiferina* на основе их химического состава. Таким образом, были выявлены их хемотипы и удалось выяснить, что у вида *C. mitis* чаще всего встречается хемотип с усниновой и рангиформовой кислотами (87,1 % образцов), а у *C. arbuscula* – только с усниновой кислотой (58,3 %).

Литература

1. Цуриков, А. Г. Гербарий лишайников Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины / А. Г. Цуриков. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – 219 с.
2. Содержание микроэлементов в лишайниках Припятского заповедника (БССР) / С. К. Лапицкая, В. Г. Свириденко, А. С. Паламарчук [и др.] // Растительные ресурсы. – 1979. – Т. 15, вып. 4. – С. 584–587.
3. Лишайники / А. С. Паламарчук, О. П. Шахрай, Л. Н. Парукова // Сельское хозяйство Белоруссии. – 1975. – № 1. – С. 43.
4. Голубков, В. В. Лихенобиота Национального парка «Припятский» / В. В. Голубков. – Минск : Белорусский Дом печати, 2011. – 192 с.
5. Tsurykau, A. The lichens of the *Cladonia pyxidata-chlorophaea* complex in Belarus / A. Tsurykau, V. Golubkov // Folia Cryptogamica Estonica. – 2015. – Vol. 52. – P. 63–71.
6. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников группы видов *Cladonia pyxidata* в Беларуси / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, Н. В. Цурикова // Веснік ВДУ. – 2015. – № 2–3. – С. 47–52.
7. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Cladonia* в Беларуси: *Cladonia grayi* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, Н. В. Цурикова // Веснік ГрДУ ім. Я. Купалы. Сер. 5, Эканоміка. Сацыялогія. Біялогія. – 2015. – № 2 (193). – С. 96–104.
8. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников группы видов *Cladonia chlorophaea* в Беларуси : *C. Chlorophaea* s. str. и *C. conista* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, Н. В. Цурикова // Веснік МДУ ім. А.А. Куляшова. Сер. В, Прыродазнаўчыя навукі (матэматыка, фізіка, біялогія). – 2015. – № 2 (46). – С. 73–83.
9. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников группы видов *Cladonia chlorophaea* в Беларуси : *Cladonia homosekikaica* и *Cladonia novochlorophaea* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, Н. В. Цурикова // Вестник БГУ. Сер. 2. – 2015. – № 3. – С. 30–33.
10. Orange, A. Microchemical methods for the identification of lichens / A. Orange, P. W. James, F. J. White. – London : British Lichen Society, 2001. – 101 p.
11. Nordic Lichen Flora : in 5 vol. / eds. T. Ahti [et al.]. – Uppsala : Museum of Evolution, Uppsala University, 1999–2013. – Vol. 5 : Cladoniaceae / ed. T. Ahti [et al.]. – 2013. – 117 p.

К изучению ассамблей жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) прибрежных экосистем озера Волотовское

Н.Г. ГАЛИНОВСКИЙ, М.В. ЕВЕНКОВА

В статье представлен анализ видовой структуры ассамблей жесткокрылых, обитающих в прибрежных ценозах озера Волотовское в черте города Гомеля – второго по величине города Беларуси. Выявлено, что прибрежные ассамблеи жесткокрылых представлены 83 видами из 59 родов 20 семейств. Прибрежные ассамблеи значительно не отличаются ни по видовому богатству, ни по численности, но в то же время видовая структура в различных местах обитания имела крайне низкое видовое сходство. Параметры альфа разнообразия ($p < 0,05$) свидетельствуют о наиболее экологически сбалансированном сообществе в местах с незначительной рекреационной нагрузкой, что, по всей видимости, связано с большим разнообразием возникающих экологических ниш, которые исчезают при ее повышении. Выявлен новый вид из семейства Anthicidae для фауны Республики Беларусь – *Notoxus brachycerus*.

Ключевые слова: жесткокрылые, прибрежные экосистемы, численность, видовая структура, альфа разнообразие.

This article presents an analysis of the species structure of beetle assemblages inhabiting the coastal communities of Lake Volotovskoye within the city limits of Gomel, the second-largest city in Belarus. It was found that the coastal assemblages contain 83 species from 59 genera of 20 families. The coastal assemblages do not differ in either species richness or species affinity, but the species structure in different habitat regions showed extremely low species similarity. Alpha diversity parameters ($p < 0,05$) indicate the most ecologically balanced community in areas with low recreational activity, which is generally associated with a greater diversity of ecological phenomena that disappear with increased activity. A new species from the family Anthicidae, *Notoxus brachycerus*, was identified for the fauna of the Republic of Belarus.

Keywords: beetles, coastal ecosystems, abundance, species structure, alfa diversity.

На протяжении последних десятилетий наблюдается значительный рост популярности отдыха у воды (дикий туризм, пляжный отдых, пикники). Побережья пресноводных озер, рек и водохранилищ, особенно расположенные вблизи крупных городов, испытывают колоссальную рекреационную нагрузку, что часто выражается в уплотнении почвы, загрязнении бытовыми отходами и изменении микроклимата прибрежных биотопов. В то же время береговая линия представляет собой классический экотон – переходную зону между водной и наземной средой. Эти зоны отличаются высоким биологическим разнообразием и хрупкостью, а нарушение прибрежной полосы напрямую разрушает среду обитания прибрежных видов, что ведет к необратимым изменениям во всей экосистеме.

Если влияние рекреации на растительность и почвенные микроорганизмы изучено достаточно хорошо, то реакция сообществ жесткокрылых на фактор беспокойства со стороны отдыхающих остается малоисследованной областью. Существует ряд исследований, касающихся изучения ассамблей прибрежных жесткокрылых г. Гомеля [1]–[4], но они недостаточны для полного понимания наносимого ущерба. Изучение же массовых, фоновых видов жесткокрылых, обеспечивающих устойчивость прибрежных биоценозов, позволяет спрогнозировать долгосрочные последствия антропогенной трансформации берегов.

В условиях усиления процесса урбанизации и развития внутреннего туризма изучение пределов устойчивости прибрежных экосистем становится критически важным для их сохранения. Полученные результаты позволят не только углубить фундаментальные представления о механизмах устойчивости экосистем, но и внесут вклад в разработку стратегии экологически безопасного рекреационного природопользования на пресноводных водоемах.

В связи с этим целью нашего исследования выступило изучение видового состава, структуры и параметров альфа разнообразия в ассамблеях жесткокрылых прибрежных экосистем одного из наиболее крупных озер расположенного в г. Гомеле и активно используемого населением для отдыха.

Материал и методика. Для достижения поставленной цели на берегу озера Волотовское в г. Гомеле на расстоянии 10 метров от уреза воды были осуществлены исследования на стационарах, заложенных в 2025 г.:

1) Стационар 1. Почва песчаная, растительность травянистая, представлена следующими видами: бодяк полевой (*Cirsium arvense*), ожика волосистая (*Luzula pilosa*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*), марьянник (*Melampyrum* sp.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis*). Кроме этого встречались редкие кустарники малины (*Rubus idaeus*). Проективное покрытие около ловушек колебалось от 50 до 83 % (66,5 %). Характеризовался высокой рекреационной нагрузкой, часто посещается отдыхающими и рыбаками.

2) Стационар 2. Почва песчаная, растительность травянистая, представлена следующими видами: мятлик луговой (*Poa pratensis*), подорожник большой (*Plantago major*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*), ежа сборная (*Dactylis glomerata*), лютик полевой (*Ranunculus arvensis*), полынь полевая (*Artemisia campestris*), горошек мышиный (*Vicia cracca*), хлопчатка луговая (*Lathyrus pratensis*). Кроме этого, наблюдался слабый моховый покров. Проективное покрытие около ловушек колебалось от 49 до 90 % (69,5 %). Характеризуется низкой рекреационной нагрузкой, посещается преимущественно рыбаками.

3) Стационар 3. Почва песчаная, растительность травянистая, представлена следующими видами: щавель кислый (*Rumex acetosa*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare*), ослинник двулетний (*Oenothera biennis*), полынь полевая (*Artemisia campestris*), лютик полевой (*Ranunculus arvensis*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*). Кроме этого, наблюдался слабый моховый покров. Проективное покрытие около ловушек колебалось от 30 до 80 % (55,0 %). Не подвергался рекреационному воздействию.

Учет жесткокрылых проводился с начала июня до конца сентября 2025 г. при помощи почвенных ловушек. В качестве почвенных ловушек использовались полистироловые стаканы объемом 0,5 л, на одну треть заполненные 9 % раствором уксусной кислоты. Ловушки выставлялись из расчета 10 почвенных ловушек на один стационар. Ловушки менялись регулярно, один раз в 15 дней. Всего было обработано 1050 ловушко-суток на каждом стационаре.

Первичный учет таксономических групп и их численности и экологических особенностей проводились с помощью электронных таблиц Libre Office Calc свободно распространяемого программного пакета Libre Office 25 (<https://www.libreoffice.org>). Расчёт средних и их ошибок, однофакторный дисперсионный анализ сравнения численности, кластерный анализ видового сходства проводили с использованием пакета PAST 5.2.1 [5]. Для определения индексов альфа-разнообразия, а также достоверности их различий использовали возможности языка R (пакеты *vegan*, *FSA*). Достоверность различий индексов разнообразия, доминирования и выравнивания проводили с использованием будстреп распределения [6]. Доминирование в ассамблеях определяли по шкале Ренконена [7]. Видовые названия и таксономический порядок жесткокрылых приведены согласно Каталогу жесткокрылых Беларуси [8].

Авторы выражают глубокую благодарность доктору биологических наук, профессору О.Р. Александровичу за помощь в определении некоторых видов, в частности – *Notoxus brachycerus*.

Результаты и обсуждение. В результате исследований на трех стационарах было собрано 873 экземпляра жесткокрылых, представленных 83 видами из 59 родов 20 семейств (таблица 1). По численности преобладали жесткокрылые с контрольного стационара №3 – 320 экземпляров, тогда как остальные ассамблеи уступали незначительно (в 1,2 и 1,1 раза) и статистически значимых различий выявлено не было. По видовому богатству трех стационаров различия также были малозначительны.

Таблица 1 – Видовой состав и относительное обилие (%) жесткокрых в ассамблеях исследованных прибрежных участков

Семейство и вид	Стационар		
	№1	№2	№3
1	2	3	4
CARABIDAE LATREILLE, 1802	17,9	41,7	29,6
<i>Leistus</i> (s. str.) <i>terminatus</i> (Panzer, 1793)	0,7	0	0
<i>Notiophilus palustris</i> (Duftschmid, 1812)	0	0,4	0

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
<i>Carabus</i> (s. str.) <i>granulatus granulatus</i> Linnaeus, 1758	0	0,7	0
<i>Bembidion</i> (s. str.) <i>quadrinaculatum quadrinaculatum</i> (Linnaeus, 1761)	0,4	0,4	0
<i>Bembidion</i> (<i>Metallina</i>) <i>lampros</i> (Herbst, 1784)	0	0,4	0
<i>Bembidion</i> (<i>Metallina</i>) <i>properans</i> (Stephens, 1828)	0	0,7	0,3
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>affinis</i> (Schrank, 1781)	0	0,4	1,6
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>anxius</i> (Duftschmid, 1812)	0,7	1,1	4,4
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>distinguendus</i> (Duftschmid, 1812)	0,4	0,7	0,6
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>flavescens</i> (Piller et Mitterpacher, 1783)	0	0,4	0
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>laevipes</i> Zetterstedt, 1828	0	0	0,3
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>rubripes</i> (Duftschmid, 1812)	0,7	16,8	10,9
<i>Harpalus</i> (s. str.) <i>tardus</i> (Panzer, 1797)	0,7	1,1	0
<i>Harpalus</i> (<i>Pseudoophonus</i>) <i>rufipes</i> (De Geer, 1774)	0,7	0,4	1,9
<i>Microlestes minutulus</i> (Goeze, 1777)	0,4	0	0
<i>Badister</i> (s. str.) <i>bullatus</i> (Schrank, 1798)	0,7	0	0
<i>Oodes helopioides</i> (Fabricius, 1792)	0	0	0,3
<i>Panagaeus</i> (s. str.) <i>cruxmajor</i> (Linnaeus, 1758)	0,4	0	0
<i>Poecilus</i> (s. str.) <i>cupreus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,7	0
<i>Poecilus</i> (s. str.) <i>versicolor</i> (Sturm, 1824)	0	5,6	0,3
<i>Pterostichus</i> (<i>Phonias</i>) <i>strenuus</i> (Panzer, 1797)	0,4	0,4	0,3
<i>Pterostichus</i> (<i>Platysma</i>) <i>niger niger</i> (Schaller, 1783)	0	0	0,3
<i>Pterostichus</i> (<i>Pseudomaseus</i>) <i>nigrita nigrita</i> (Paykull, 1790)	0,7	0	0
<i>Calathus</i> (s. str.) <i>fuscipes fuscipes</i> (Goeze, 1777)	2,1	2,2	1,9
<i>Calathus</i> (<i>Neocalathus</i>) <i>erratus erratus</i> (Sahlberg, 1827)	1,4	1,1	0
<i>Calathus</i> (<i>Neocalathus</i>) <i>melanocephalus melanocephalus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0,6
<i>Calathus</i> (<i>Neocalathus</i>) <i>micropterus</i> (Duftschmid, 1812)	5,6	1,1	0,3
<i>Dolichus halensis</i> (Schaller, 1783)	0,4	0	0
<i>Amara</i> (s. str.) <i>aenea</i> (De Geer, 1774)	1,1	4,1	3,8
<i>Amara</i> (s. str.) <i>communis</i> (Panzer, 1797)	0	1,5	0,6
<i>Amara</i> (s. str.) <i>tibialis</i> (Paykull, 1798)	0	0	0,6
<i>Amara</i> (<i>Bradytus</i>) <i>fulva</i> (Degeer, 1774)	0	0	0,3
<i>Amara</i> (<i>Zezea</i>) <i>plebeja</i> (Gyllenhal, 1810)	0,4	1,5	0,3
HISTERIDAE GYLLENHAL, 1808	0,7	0	0
<i>Margarinotus</i> (<i>Paralister</i>) <i>purpurascens</i> (Herbst, 1792)	0,7	0	0
SILPHIDAE LATREILLE, 1807	0,4	4,8	0
<i>Phosphuga atrata atrata</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,4	0
<i>Silpha carinata</i> Herbst, 1783	0,4	0,7	0
<i>Silpha obscura obscura</i> Linnaeus, 1758	0	3,7	0
STAPHYLINIDAE LATREILLE, 1802	1,5	0	0,9
<i>Drusilla</i> (s. str.) <i>canaliculata canaliculata</i> (Fabricius, 1787)	1,1	0	0,6
<i>Ocyopus</i> (<i>Matidus</i>) <i>nitens nitens</i> (Schrank, 1781)	0	0	0,3
<i>Staphylinus erythropterus erythropterus</i> Linnaeus, 1758	0,4	0	0
LUCANIDAE LATREILLE, 1806	0,7	1,1	2,2
<i>Dorcus parallelipedus</i> (Linnaeus, 1758)	0,7	1,1	2,2
SCARABAEIDAE LATREILLE, 1802	12,7	11,6	19,4
<i>Rhyssalus germanus</i> (Linnaeus, 1767)	0	0,4	0
<i>Onthophagus nuchicornis</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,4	0
<i>Hoplia</i> (s. str.) <i>graminicola</i> (Fabricius, 1792)	12,0	9,7	17,5
<i>Hoplia</i> (s. str.) <i>parvula</i> Krynickii, 1832	0,7	1,1	0,3
<i>Serica</i> (s. str.) <i>brunnea</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0,3
<i>Anomala dubia dubia</i> (Scopoli, 1763)	0	0	1,3
EUCINETIDAE LACORDAIRE, 1857	0,7	0	0
<i>Eucinetus haemorrhoidalis</i> (Germar, 1818)	0,7	0	0
BYRRHIDAE LATREILLE, 1806	0	0,4	0
<i>Byrrhus</i> (s. str.) <i>pilula pilula</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,4	0
ELATERIDAE LEACH, 1815	2,5	11,9	1,9
<i>Agrypnus murinus</i> (Linnaeus, 1758)	0,4	2,6	1,9
<i>Synaptus filiformis</i> (Fabricius, 1781)	0	0,4	0
<i>Agriotes</i> (s. str.) <i>lineatus</i> (Linnaeus, 1767)	0	2,2	0

Окончание таблицы 1

<i>Sericus</i> (s. str.) <i>brunneus</i> (Linnaeus, 1758)	2,1	6,3	0
<i>Selatosomus</i> (s. str.) <i>aeneus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,4	0
DERMESTIDAE LATREILLE, 1807	27,0	1,1	0
<i>Dermestes</i> <i>lanarius</i> Illiger, 1801	27,0	1,1	0
NITIDULIDAE LATREILLE, 1802	2,6	0,4	1,2
<i>Glischrochilus</i> (s. str.) <i>quadripunctatus</i> (Linnaeus, 1758)	0,7	0	0,6
<i>Glischrochilus</i> (Librodor) <i>quadriguttatus</i> (Fabricius, 1777)	0,4	0	0,3
<i>Omosita</i> <i>colon</i> (Linnaeus, 1758)	1,1	0,4	0
<i>Soronia</i> <i>grisea</i> (Linnaeus, 1758)	0,4	0	0,3
SILVANIDAE KIRBY, 1837	0	0	0,3
<i>Silvanus</i> <i>bidentatus</i> (Fabricius, 1792)	0	0	0,3
PHALACRIDAE LEACH, 1815	1,1	0	0
<i>Phalacrus</i> <i>caricis</i> Sturm, 1807	1,1	0	0
COCCINELLIDAE LATREILLE, 1807	0,4	0	0
<i>Scymnus</i> (s. str.) <i>frontalis</i> (Fabricius, 1787)	0,4	0	0
MORDELLIDAE LATREILLE, 1802	0,4	0	0
<i>Mordella</i> <i>aculeata</i> Linnaeus, 1758	0,4	0	0
TENEBRIONIDAE LATREILLE, 1802	23,8	20,2	35,5
<i>Opatrum</i> (s. str.) <i>sabulosum</i> (Linnaeus, 1761)	0	0	0,3
<i>Crypticus</i> (s. str.) <i>quisquilius quisquilius</i> (Linnaeus, 1761)	23,8	20,2	35,2
ANTHICIDAE LACORDAIRE, 1825	1,5	0	0,3
<i>Notoxus</i> <i>brachycerus</i> (Faldermann, 1837)	0,4	0	0
<i>Notoxus</i> <i>monoceros</i> (Linnaeus, 1761)	1,1	0	0,3
CERAMBYCIDAE LATREILLE, 1802	0	1,5	0,3
<i>Aromia</i> <i>moschata moschata</i> (Linnaeus, 1758)	0	1,5	0,3
CHRYSOMELIDAE LATREILLE, 1802	1,5	3,4	4,4
<i>Oulema</i> <i>erichsonii</i> (Suffrian, 1841)	0	1,9	0
<i>Cassida</i> <i>nebulosa</i> Linnaeus, 1758	0,4	0,4	0
<i>Galeruca</i> (s. str.) <i>tanacetii tanacetii</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,7	4,4
<i>Chaetocnema</i> (s. str.) <i>concinna</i> (Marsham, 1802)	0	0,4	0
<i>Longitarsus</i> (s. str.) <i>lycopi</i> (Foudras, 1860)	1,1	0	0
CURCULIONIDAE LATREILLE, 1802	4,6	1,9	4
<i>Baris</i> <i>artemisiae</i> (Herbst, 1795)	0	0	0,6
<i>Glocianus</i> <i>punctiger</i> (Sahlberg, 1835)	0	0,4	0,3
<i>Tychius</i> (s. str.) <i>picrostris</i> (Fabricius, 1787)	0	0	0,3
<i>Strophosoma</i> (s. str.) <i>capitatum</i> (Degeer, 1775)	0	0,4	0
<i>Otiorhynchus</i> (<i>Choilisanus</i>) <i>raucus</i> (Fabricius, 1777)	0	0,7	0
<i>Otiorhynchus</i> (<i>Pendragon</i>) <i>ovatus ovatus</i> (Linnaeus, 1758)	4,2	0	2,2
<i>Exomias</i> <i>pellucidus pellucidus</i> (Boheman, 1843)	0	0	0,3
<i>Tanymecus</i> (s. str.) <i>palliatu</i> s (Fabricius, 1787)	0	0,4	0
<i>Romualdius</i> <i>scaber</i> (Linnaeus, 1758)	0,4	0	0
<i>Hypera</i> (<i>Dapalinus</i>) <i>meles</i> (Fabricius, 1792)	0	0	0,3
Всего экземпляров	285	268	320
Всего видов	43	47	42
Динамическая плотность	0,200 ± 0,011	1,186 ± 0,098	0,223 ± 0,097
Информационное разнообразие Шеннона, H'	2,56	2,74	2,47
Концентрация доминирования Симпсона, 1-D	0,89	0,91	0,86
Выравненность по Пилелу, e	0,82	0,83	0,76

В то же время, оценивая видовое сходство в исследованных ассамблеях жесткокрылых на основе коэффициента видового сходства Жаккара, было выявлено, что они очень слабо сходны между собой (рисунок 1).

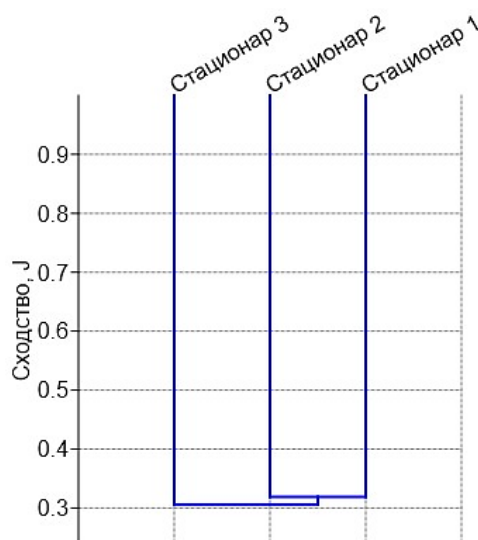


Рисунок 1 – Дендрограмма видового сходства по Жаккару ассамблей жесткокрылых на исследованных стационарах

Такие низкие показатели значения коэффициента Жаккара можно связать с тем, что на исследованных стационарах нами было выявлено только 14 общих видов, встречающихся на каждом из стационаров: жужелицы *H. anxius*, *H. distinguendus*, *H. rubripes*, *H. rufipes*, *Pt. strenuus*, *C. fuscipes*, *C. micropterus*, *A. aenea*, *A. plebeja*, рогачик *D. parallelipipedus*, цветоройки *H. graminicola*, *H. parvula*, шелкоун *A. murinus* и чернотелка *C. quisquilius* (таблица 1).

Для каждого из рассмотренных нами стационаров были также выявлены виды, которые были характерные только для них. Так только в ассамблях жуков стационара 1 были отмечены жужелицы *L. terminatus*, *B. bullatus*, *P. cruxmajor*, *Pt. nigrita* и *D. halensis*, карапузик *M. purpurascens*, стафилинида *S. erythropterus*, эуцинетида *E. haemorrhoidalis* и долгоносик *Romualdius scaber* (таблица 1). Особого внимания заслуживает вид *Notoxus brachycerus* (рисунок 2), обнаруженный только на 1 стационаре и являющийся впервые достоверно выявленным для фауны Беларуси [8]. Только в ассамблеях жесткокрылых на 2 стационаре были встречены жужелицы *N. palustris*, *C. granulatus*, *B. lampros*, *H. flavescens*, *P. cupreus*, мертвоеды *Ph. atrata*, *S. obscura*, пластинчатоусые *Rh. germanus*, *O. nuchicornis*, пилюльщик *B. pilula*, шелкоуны *S. filiformis*, *A. lineatus*, *S. aeneus*, листоеды *O. erichsonii*, *Ch. concinna*, долгоносики *S. capitatum*, *O. raucus*, *T. palliatus*.

В ассамблее жесткокрылых стационара 3 (контроле) было установлено 15 видов, обнаруженных только здесь: это жужелицы *H. laevipes*, *O. helopioides*, *Pt. niger*, *C. melanocephalus*, *A. tibialis*, *A. fulva*, стафилинида *Ocupus nitens*, пластинчатоусые *S. brunnea* и *A. dubia*, сильванида *S. bidentatus*, чернотелка *O. sabulosum* и долгоносики *B. artemisiae*, *T. picirostris*, *E. pellucidus*, *H. meles* (таблица 1).



Рисунок 2 – *Notoxus brachycerus*

При оценке параметров разнообразия было выявлено, что наивысшее информационное разнообразие (индекс Шеннона) было характерно для ассамблей, подвергающихся невысокой рекреационной нагрузке (стационар 2) – 2,74. Это может указывать на наибольшее разнообразие и равномерность распределения видов. При этом данный показатель статистически значимо ($p < 0,05$) отличается от остальных ассамблей (таблица 1, рисунок 3). То есть можно сказать, что ассамблеи жесткокрылых стационара 2 демонстрируют наиболее сбалансированное экологическое сообщество.

Концентрация доминирования Симпсона демонстрирует достаточно высокое разнообразие, хоть и характерное для всех исследованных стационаров, но, несмотря на это, эти показатели имели статистически значимую разницу ($p < 0,05$). Наиболее значимые различия наблюдались между ассамблеями жуков стационаров 2 и 3 (таблица 1, рисунок 4).

Это также согласуется и с показателями выравненности. Для всех исследованных участков она выявлена как достаточно высокая (таблица 1). При этом следует отметить, что в ассамблеях жесткокрылых стационара 2 виды распределены наиболее равномерно и нет ярко выраженного доминирования. При этом эти отличия статистически значимы как с ассамблеями жуков стационара 1 ($p < 0,05$), так и стационара 3 ($p < 0,001$). То есть выявленная выравненность видов в исследованных ассамблеях подтверждает реальные различия в структуре сообществ между стационарами.

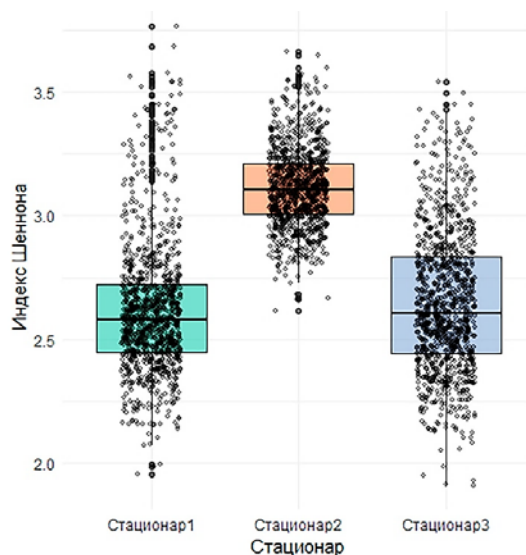


Рисунок 3 – Информационное разнообразие в прибрежных ассамблеях жесткокрылых оз. Волотовское

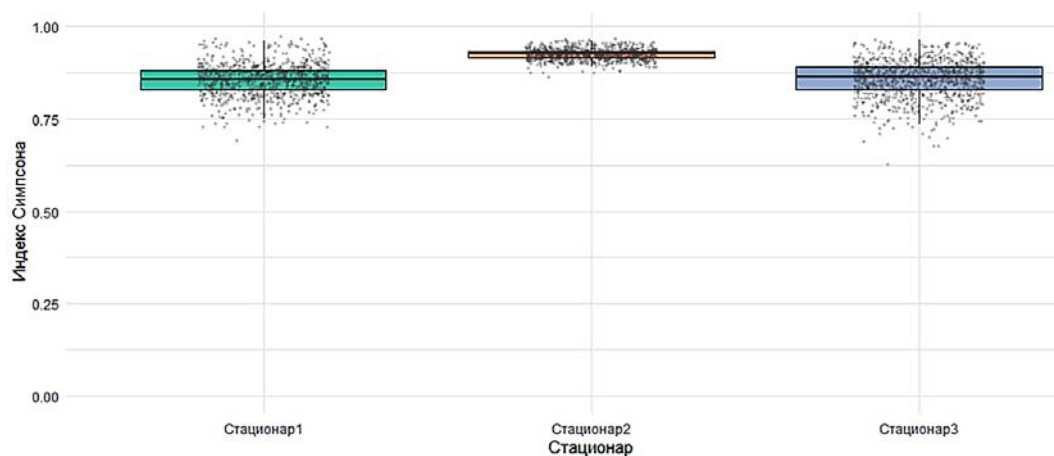


Рисунок 4 – Концентрация доминирования Симпсона в прибрежных ассамблеях жесткокрылых оз. Волотовское

Таким образом, оценивая предварительные результаты исследований прибрежных ассамблей жесткокрылых озера Волотовского в г. Гомеле, можно сделать ряд **выводов**:

1. Прибрежные ассамблеи жесткокрылых представлены 83 видами из 59 родов 20 семейств.
2. Прибрежные ассамблеи статистически значимо не отличаются ни по видовому богатству, ни по численности, но в тоже время видовая структура в различных местах обитания имеет низкое видовое сходство.
3. Выявленные параметры разнообразия свидетельствуют о наиболее экологически сбалансированном сообществе в местах с незначительной рекреационной нагрузкой, что по всей видимости связано с большим разнообразием возникающих экологических ниш, которые исчезают при повышении рекреационной нагрузки.
4. Выявлен новый вид блестянок (семейство Anthicidae) для фауны Республики Беларусь – *Notoxus brachycerus*.

Литература

1. Галиновский, Н. Г. Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) береговых урбозенозов реки Сож (на примере г. Гомеля) / Н. Г. Галиновский // Экологический вестник. – 2009. – № 1. – С. 116–124.
2. Halinowski, M. H. Ecological and faunistic review of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in Gomel urbocenosis (The Republic of Belarus) / M. H. Halinowski, A. M. Krytskaya // Vestnik zoologii. – 2014. – № 48 (6). – P. 451–462.
3. Галиновский, Н. Г. Эколого-фаунистический обзор жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) прибрежных сообществ рек Сож и Ипуть в окрестностях города Гомель / Н. Г. Галиновский, А. А. Кабышева // Веснік МДУ ім. І.П. Шамякіна. – 2016. – № 2. – С. 22–29.
4. Протченко, А. А. К изучению сообществ жужелиц (Coleoptera, Carabidae) некоторых прибрежных экосистем Гомельской области с разной степенью рекреационной нагрузки / А. А. Протченко, Н. Г. Галиновский // Известия ГГУ. – 2022. – № 6. – С. 50–55.
5. Hammer, Ø. PAST : Paleontological statistics software package for education and data analysis / Ø. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // Palaeontol. Electron. – 2001. – Vol. 4, № 1. – P. 1–9.
6. Брюс, П. Практическая статистика для специалистов Data Science / П. Брюс, Э. Брюс, П. Гелек. – СПб. : БХВ-Петербург, 2022. – 352 с.
7. Renkonen, O. Statistish-Okologische Untersuchungen uber die terrestrische Kaferwelt der finnischen Bruchmoore / O. Renkonen // Ann. Zool. – Bot. Soc. Fennicae. – 1938. – № 6. – P. 1–30.
8. Aleksandrowicz, O. The Check-list of Belarus Coleoptera / O. Aleksandrowicz, A. Pisanenko, S. Ryndevich [et al.]. – Slupsk, 2023. – 192 p.

Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких промысловых копытных животных в зависимости от возрастной и половой структуры

А.В. Гулаков¹, Д.Н. Дроздов²

В статье представлены результаты анализа удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких промысловых копытных, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях, в зависимости от пола и возраста животных. В ходе исследований у дикого кабана, добытого в зоне отчуждения, не выявлено значимых изменений активности ^{137}Cs в мышечной ткани в зависимости от возраста. Однако у животных в возрасте 2–3 лет наблюдалась тенденция к более высокой активности ^{137}Cs в мышцах. У европейской косули активность ^{137}Cs в организме молодых особей (до 2 лет) находилась в пределах $9,14 \pm 3,95$ кБк/кг, в то время как у более взрослых животных она была в 2 раза выше – $19,18 \pm 4,66$ кБк/кг. У лося, обитающего в зоне отчуждения, удельная активность ^{137}Cs как в группе животных 2–3 лет, так и в возрасте 4–6 лет находилась на одном уровне и составляла 7,73–9,90 кБк/кг. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме самок и самцов различных видов промысловых копытных, обитающих на загрязненных территориях, существенно не различалась. Тем не менее, у дикого кабана проявилась тенденция к большему накоплению ^{137}Cs в мышечной ткани у самок по сравнению с самцами. Активность ^{137}Cs в мышечной ткани кабана в зоне отчуждения составила 39,71 кБк/кг у самцов и 52,34 кБк/кг у самок, в зоне отселения – 7,19 кБк/кг и 14,07 кБк/кг соответственно.

Ключевые слова: лось, европейская косуля, дикий кабан, ^{137}Cs , ^{90}Sr , пол, возраст.

The article presents the results of the analysis of the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides in the body of wild game ungulates inhabiting radioactively contaminated territories, depending on the animals' sex and age. The study revealed no significant changes in ^{137}Cs activity in the muscle tissue of wild boar harvested in the exclusion zone related to age. However, animals aged 2–3 years showed a tendency toward higher ^{137}Cs activity in muscles. In the European roe deer, the ^{137}Cs activity in young individuals (up to 2 years old) was lower, ranging within $9,14 \pm 3,95$ kBq/kg, while in older animals, it was twice as high, reaching $19,18 \pm 4,66$ kBq/kg. In elk inhabiting the exclusion zone, the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in both the 2–3 and 4–6 year-old groups was at the same level, ranging from 7,73 to 9,90 kBq/kg. The specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the bodies of females and males of various game ungulate species living in contaminated areas did not differ significantly. Nevertheless, wild boars exhibited a tendency toward higher ^{137}Cs accumulation in the muscle tissue of females compared to males. The ^{137}Cs activity in the muscle tissue of wild boar in the Exclusion Zone was 39,71 kBq/kg for males and 52,34 kBq/kg for females; in the resettlement zone, these values were 7,19 kBq/kg and 14,07 kBq/kg, respectively.

Keywords: elk, european roe deer, wild boar, ^{137}Cs , ^{90}Sr , sex, age.

Введение. В настоящее время проблемы охраны окружающей среды и рационального использования биологических ресурсов во всем мире привлекают особое внимание. В процессе эксплуатации объектов атомной энергетики, а также при различных радиационных авариях возрастает вероятность попадания техногенных радионуклидов в различные компоненты биосферы [1].

Радиоактивное загрязнение наземных и водных биогеоценозов рассматривается как новый абиотический фактор среды, требующий изучения в рамках охраны биологических ресурсов. Катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции является крупнейшей по своим масштабам и нанесенному ущербу в истории развития атомной энергетики на планете. В результате аварии образовались значительные территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Данное обстоятельство продиктовало необходимость проведения глобальных радиологических и радиобиологических исследований по изучению закономерностей миграции техногенных радионуклидов в биосфере и воздействия ионизирующего излучения на живые организмы в их естественной среде обитания [2].

Ионизирующее излучение является постоянно действующим фактором окружающей среды, значение которого неуклонно возрастает. Это требует изучения процессов взаимодействия живых организмов друг с другом и с окружающей средой в условиях радиоактивного загрязнения и повышенного радиационного фона [3]. Для современной радиоэкологии эта проблема сохраняет свою актуальность [4].

В результате аварии на Чернобыльской АЭС произошло значительное загрязнение лесных экосистем, которые ранее активно использовались для охоты и рыболовства, а также являлись источником сырья для промышленности. Люди и животные подверглись хроническому внешнему и внутреннему (инкорпорированному) облучению.

Поэтому изучение особенностей накопления и распределения радионуклидов, выявление видовых, половых, возрастных и сезонных различий в концентрации радиоизотопов в организме диких животных, обитающих в загрязненных биогеоценозах, представляет большой научный и практический интерес. Кроме того, дары природы, включая мясо диких промысловых копытных, могут быть дополнительным источником поступления радионуклидов в организм человека и приводить к увеличению дозовых нагрузок на население, проживающее на радиоактивно загрязненной территории [5].

Цель работы – провести анализ удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких промысловых копытных животных в зависимости от возрастной и половой структуры.

Материалы и методы исследования. Исследование, проведенное в условиях Белорусского Полесья, позволило выявить роль возраста и пола в накоплении ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких копытных (лось, косуля, кабан), обитающих на территории радиоактивного загрязнения после Чернобыльской аварии. Мониторинг в зонах отчуждения и зоны отселения с постоянным контролем (Гомельская область) показал, что мясо диких животных является источником поступления радионуклидов и создает дополнительные дозовые нагрузки на население. Зимой животных добывали утром, при небольшом снеге – загоном или подходом, летом – ночью или рано утром, используя охотничье оружие.

В ходе исследования получены пробы мышечной и костной ткани от 393 диких копытных, из них 295 из зоны отчуждения, 98 из зоны отселения, добытые без иных повреждений, кроме пулевых, с измерением активности ^{137}Cs (МКС-АТ1315, РКГ-АТ1320А) и ^{90}Sr (Canberra-2004). Данные, рассчитанные на сырой вес, обработаны в Microsoft Excel 2007 и пакете прикладных статистических программ Statistica 8, методы регрессионного и дисперсионного анализа (ANOVA).

Результаты исследований и их обсуждение. Для определения возрастных различий в накоплении основных дозообразующих радионуклидов в организме промысловых копытных было проанализировано содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме животных различных возрастных групп. В таблице 1 представлена зависимость активности ^{137}Cs в мышечной ткани диких копытных, обитающих на территориях с различной плотностью радиоактивного загрязнения в зависимости от возраста.

Таблица 1 – Активность ^{137}Cs в мышечной ткани диких копытных, добытых в зоне отчуждения и зоне отселения, в зависимости от возраста

Вид	Возраст, лет	Территория	N	Активность ^{137}Cs в мышцах, кБк/кг
Лось	< 2	Зона отчуждения	–	–
	2–3	Зона отчуждения	11	$9,90 \pm 2,48$
	4–6	Зона отчуждения	21	$7,73 \pm 1,25$
Косуля	< 2	Зона отчуждения	5	$9,14 \pm 3,95$
	2–3	Зона отчуждения	19	$19,18 \pm 4,66$
	4–6	Зона отчуждения	5	$16,61 \pm 8,03$
Дикий кабан	Up to 2	Зона отчуждения	12	$26,87 \pm 9,30$
	2–3	Зона отчуждения	20	$16,15 \pm 3,88$
	4–6	Зона отчуждения	12	$18,26 \pm 4,81$
Лось	< 2	Зона отселения	2	$1,43 \pm 1,24$
	2–3	Зона отселения	16	$3,40 \pm 1,05$
	4–6	Зона отселения	10	$1,81 \pm 0,37$

Окончание таблицы 1

Косуля	< 2	Зона отселения	2	$9,19 \pm 2,90$
	2–3	Зона отселения	20	$6,69 \pm 1,10$
	4–6	Зона отселения	3	$7,60 \pm 3,37$
Дикий кабан	< 2	Зона отселения	10	$18,29 \pm 9,82$
	2–3	Зона отселения	25	$13,39 \pm 3,96$
	4–6	Зона отселения	11	$9,19 \pm 2,90$

Анализ содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr у охотничьих копытных показал, что у дикого кабана в зоне отчуждения значимых возрастных изменений активности ^{137}Cs нет, однако у особей 2–3 лет наблюдается высокая вариабельность (226 %) и тенденция к повышенному накоплению из-за миграции. У европейской косули активность ^{137}Cs у молодых особей (до 2 лет) составила $9,14 \pm 3,95$ кБк/кг, что в два раза ниже, чем у старших особей ($19,18 \pm 4,66$ кБк/кг).

У лосей из зоны отчуждения удельная активность ^{137}Cs у особей 2–3 и 4–6 лет находилась на уровне 7,73–9,90 кБк/кг, при этом в зоне постоянного контроля возрастных различий в накоплении радионуклида в мышцах не выявлено [4].

Исследования в Швеции после аварии на ЧАЭС показали, что у молодых лосей активность ^{137}Cs была на 10–40 % выше, чем у взрослых [3]. Также определена удельная активность ^{90}Sr в костной ткани исследованных животных, представленная в таблице 2.

Таблица 2 – Активность ^{90}Sr в костной ткани диких копытных, добытых в зоне отчуждения и зоне постоянного контроля, в зависимости от возраста

Вид	Возраст, лет	Территория	N	Активность в костной ткани, кБк/кг
Лось	< 2	Зона отчуждения	–	–
	2–3	Зона отчуждения	5	$4,25 \pm 0,99$
	4–6	Зона отчуждения	15	$2,81 \pm 0,46$
Косуля	< 2	Зона отчуждения	–	–
	2–3	Зона отчуждения	19	$6,05 \pm 1,68$
	4–6	Зона отчуждения	4	$6,49 \pm 3,89$
Дикий кабан	< 2	Зона отчуждения	6	$16,40 \pm 9,78$
	2–3	Зона отчуждения	16	$14,07 \pm 7,92$
	4–6	Зона отчуждения	9	$7,30 \pm 2,93$
Лось	< 2	Зона отселения	2	$0,61 \pm 0,55$
	2–3	Зона отселения	5	$1,23 \pm 0,27$
	4–6	Зона отселения	8	$0,79 \pm 0,17$
Косуля	< 2	Зона отселения	1	7,57
	2–3	Зона отселения	15	$4,25 \pm 1,09$
	4–6	Зона отселения	4	$2,74 \pm 1,07$
Дикий кабан	< 2	Зона отселения	6	$10,45 \pm 5,43$
	2–3	Зона отселения	14	$7,36 \pm 2,10$
	4–6	Зона отселения	4	$2,53 \pm 0,85$

Результаты проведенных исследований показывают, что у диких промысловых животных, обитающих на территориях с различной плотностью радиоактивного загрязнения, отсутствуют значимые различия в содержании ^{90}Sr в костной ткани [4].

Полученные данные согласуются с результатами исследований А.И. Ильенко, который выявил возрастные различия в концентрации ^{90}Sr в условиях его длительного поступления в организм мышевидных грызунов [2].

В итоге проведенных исследований не было обнаружено существенных различий в накоплении ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких копытных, обитающих на территории зоны отчуждения и зоны постоянного контроля, в зависимости от возраста, однако вариабельность этого показателя выше у молодых животных.

Нами также был проведен анализ активности радионуклидов в организме диких копытных в зависимости от пола животных. Данные о содержании радионуклидов у различных видов диких копытных в зависимости от пола представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких копытных в зависимости от пола

Вид	Территория	Пол	N	Активность ^{137}Cs в мышцах, кБк/кг	N	Активность ^{90}Sr в костной ткани, кБк/кг
Лось	Зона отчуждения	самец	46	$11,00 \pm 2,90$	24	$2,67 \pm 0,43$
		самка	28	$6,34 \pm 1,52$	10	$3,74 \pm 1,17$
	Зона отселения	самец	12	$2,01 \pm 0,40$	7	$1,06 \pm 0,24$
		самка	16	$4,21 \pm 1,07$	8	$0,78 \pm 0,17$
Косуля	Зона отчуждения	самец	53	$15,37 \pm 2,98$	29	$6,45 \pm 1,63$
		самка	57	$24,76 \pm 7,32$	26	$4,73 \pm 1,00$
	Зона отселения	самец	14	$6,95 \pm 1,43$	12	$4,67 \pm 1,26$
		самка	11	$7,06 \pm 1,32$	8	$3,28 \pm 1,09$
Дикий кабан	Зона отчуждения	самец	50	$39,71 \pm 13,84$	29	$14,70 \pm 5,96$
		самка	61	$52,34 \pm 15,05$	37	$21,02 \pm 5,30$
	Зона отселения	самец	22	$7,19 \pm 1,93$	11	$3,99 \pm 1,17$
		самка	23	$14,07 \pm 4,06$	16	$8,61 \pm 2,62$

Как видно из приведенных выше данных, активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме самок и самцов промысловых копытных, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях, существенно не различалась. Тем не менее, у дикого кабана проявилась тенденция к большему накоплению ^{137}Cs в мышечной ткани у самок по сравнению с самцами. Активность ^{137}Cs в мышечной ткани кабана в зоне отчуждения составила 39,71 кБк/кг у самцов и 52,34 кБк/кг у самок, а в зоне постоянного контроля – 7,19 кБк/кг и 14,07 кБк/кг соответственно [4].

По данным других авторов [2], различия в накоплении радионуклидов у диких животных в зависимости от пола наблюдаются только в период размножения. В то же время, согласно результатам исследований шведских ученых в начальный период после аварии, у самцов отмечалось более высокое содержание ^{137}Cs по сравнению с самками [6].

Таким образом, нами не было обнаружено достоверных различий в накоплении ^{137}Cs в мышечной ткани диких млекопитающих, обитающих в зонах отчуждения и отселения, в зависимости от возраста, однако вариабельность этого показателя выше у молодых особей (коэффициент вариации данного признака составил более 200 %).

В условиях постоянного обитания дикого кабана на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения наблюдается увеличение активности ^{90}Sr в костной ткани молодых животных. Чем выше уровень загрязнения среды обитания, тем более выражены различия в накоплении радионуклидов в организме кабанов разных возрастных групп.

Как видно из представленных результатов, активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме самок и самцов промысловых копытных существенно не различалась, однако у кабана сохранилась тенденция к более высокому накоплению ^{137}Cs в мышечной ткани самок по сравнению с самцами.

Заключение. В результате исследований было показано, что основными факторами, определяющими уровень ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме диких животных, являются плотность загрязнения и распределение радионуклидов на территории обитания. У дикого кабана, добытого в зоне отчуждения, не было выявлено существенных изменений активности ^{137}Cs в мышечной ткани в зависимости от возраста. Однако у животных в возрасте 2–3 лет наблюдалась тенденция к более высокой активности ^{137}Cs в мышцах. У европейской косули активность ^{137}Cs в организме молодых особей (до 2 лет) была ниже и находилась в пределах $9,14 \pm 3,95$ кБк/кг, в то время как у более взрослых животных она была в 2 раза выше – $19,18 \pm 4,66$ кБк/кг. У лося, обитающего в зоне отчуждения, удельная активность ^{137}Cs как в группе животных 2–3 лет, так и в возрасте 4–6 лет находилась на одном уровне и составляла 7,73–9,90 кБк/кг. У животных, добытых на территории с более низким уровнем радиоактивного загрязнения (зона отселения), различий в удельной активности ^{137}Cs в мышечной ткани в зависимости от возраста не обнаружено. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме самок и самцов различных видов промысловых копытных, обитающих на загрязненных территориях, существенно не различалась. Тем не менее, у дикого кабана проявилась тенденция к большему накоплению ^{137}Cs в мышечной ткани у самок по сравнению с самцами. Активность ^{137}Cs в мышечной ткани кабана в зоне отчуждения составила 39,71 кБк/кг у самцов и 52,34 кБк/кг у самок, в зоне отселения – 7,19 кБк/кг и 14,07 кБк/кг соответственно.

Литература

1. Алексахин, Р. М. Чернобыльская катастрофа и агропромышленное производство / Р. М. Алексахин // Аграрная наука. – 1996. – № 3. – С. 5–7.
2. Ильязов, Р. Г. Адаптация агроэкосферы к условиям техногенеза / Р. Г. Ильязов, П. Н. Цыгвинцев, А. В. Гулаков. – Казань, 2006. – С. 173–185.
3. Woodhead, D. S. Contamination due to radioactive materials / D. S. Woodhead // Pollution of the Seas Radioactive Materials, Heavy Metals and Oil / ed. O. Kinne. – N.Y. : John Wiley and Sons, 1984. – Vol. 5. – P. 203–215.
4. Gulakov, A. V. Accumulation and distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the body of the wild boar (*Sus scrofa*) found on the territory with radioactive contamination / A. V. Gulakov // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 127. – P. 171–175.
5. Михалусев, В. И. Эколого-радиобиологические последствия Чернобыльской катастрофы для животноводства и пути их преодоления / В. И. Михалусев. – Казань, 2002. – С. 267–294.
6. Palo, R. T. Pollution from the Chernobyl accident. Cesium-137 levels in Swedish elk in 1986–1989 years / R. T. Palo // Third International Moose Symposium : abstracts. – Syktyvkar, 1990. – P. 42.

¹Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

²Гомельский государственный
медицинский университет

Поступила в редакцию 19.03.2026

Влияние препарата микробного Грамисил на взаимоотношения эколого-трофических групп почвы в посевах озимого ячменя

И.И. КОНЦЕВАЯ, Н.М. ДАЙНЕКО, С.Ф. ТИМОФЕЕВ, Д.В. ДАЙНЕКО

В полевом опыте на основании микробиологического тестирования биопрепарата Грамисил, используемого в качестве прикорневой подкормки (в двух сроках: осенний или весенний) в посевах озимого ячменя, культивируемого на почвах юго-восточного региона республики, установлено: значение индекса олиготрофности для опытных образцов, независимо от сроков внесения препарата, указывает на одинаковую направленность процессов деструкции органического вещества и соответствует результатам прошлогоднего исследования.

Ключевые слова: почвенные микроорганизмы, эколого-трофические группы микроорганизмов, биопрепарат Грамисил.

In a field experiment based on microbiological testing of the Gramisil biopreparation, used as a root dressing (in two terms: autumn or spring) in winter barley crops cultivated on the soils of the south-eastern region of the republic, it was established that the oligotrophic index value for the experimental samples, regardless of the timing of application of the preparation, indicates the same direction of the processes of destruction of organic substances and corresponds to the results of last year's study.

Keywords: soil microorganisms, ecological-trophic groups of microorganisms, Gramisil biopreparation.

Введение. Препарат микробный Грамисил разработан в институте микробиологии НАН Беларуси. Основу препарата составляют азотфиксирующие и фосфатсольбилизирующие эндофитные бактерии, которые обладают уникальными агрономическими характеристиками: способностью к азотфиксации, фосфатсольбилизации, к синтезу гетероауксина и АЦК-дезаминазы [1], [2]. В вегетационном эксперименте разработчиками установлена эффективность действия Грамисила.

На сегодняшний день в сельскохозяйственном производстве ключевым направлением является применение микробных препаратов с целью увеличения почвенного плодородия [3]. База таких биопрепаратов ежегодно расширяется, стоит вопрос об их биотестировании в реальных агроценозах [4]. В связи с вышесказанным, несомненна актуальность темы текущего исследования. Данная работа является продолжением авторского исследования, выполненного в прошедшем году [5].

Цель работы – изучение влияния биопрепарата Грамисил на количественные и качественные соотношения между микроорганизмами почвы важных физиологических групп в посевах озимого ячменя, выращиваемого на полях юго-восточного региона республики.

Методы исследования. Тестирование выполняли в вегетационный период 2024–2025 гг. на полях агрокомбината «Южный» Гомельского района Гомельской области. Опыт был заложен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на посевах озимого ячменя сорта «Буслик». Основные варианты в эксперименте:

1) контроль (к) – без обработки посевов озимого ячменя биопрепаратом Грамисил;

2) опыт (о) – обработка посевов озимого ячменя микробным биопрепаратом Грамисил.

Изучали два срока внесения биопрепаратов: 1) в осенний период – в фазу начало кущения; 2) в весенний период – в фазу кущения; с нормой расхода биопрепарата, равной 3 л/га.

Агрохимические свойства почвы соответствовали оптимальным параметрам для злаков, характеризовались следующим: рН в КС1 – 6,0; фосфор – 296 мг/кг; калий – 272 мг/кг. Площадь опытных делянок составляла 5 м², размещение рендомизировано; повторность опытов – 4-х кратная.

Отбор образцов почвы выполняли в соответствии с [6] по следующим фазам роста и развития озимого ячменя: кущения, колошения, полная спелость. Микробиологическое исследование почвы проводили согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [7]. Численность микроорганизмов определяли в колониеобразующих единицах (КОЕ) при пере-

счете на 1 г абсолютно сухой почвы [8]. Влажность почвы выявляли термостатно-весовым методом в соответствии с ГОСТом [9]. Оценку состава и спектра микробного сообщества оценивали по коэффициенту минерализации-иммобилизации Мишустина (КАА/МПА), индексу олиготрофности Аристовской (ГА/МПА), коэффициенту педотрофности Никитина (НА/МПА) [10]. Анализ глубины и интенсивности превращения азотсодержащих соединений при участии микрофлоры почвы в тестируемых образцах выполняли по коэффициенту трансформации органического вещества $P_m = (M_{ПА} + K_{АА}) \times (M_{ПА}/K_{АА})$ [11].

Полученные в опыте данные подвергали статистической обработке с применением Excel 2010. Сравнение анализируемых показателей между контрольными и опытными группами определяли с использованием t-критерия Стьюдента [12].

Результаты исследования и их обсуждение. Метеорологические условия по данным Гомельского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период исследуемого вегетационного сезона 2025 г. представлены в таблице 1 [13], [14].

Таблица 1 – Динамика осадков и температуры воздуха в среднем по Гомельской области, 2025 г.

Параметр	III	IV	V	VI	VII	Сумма
Осадки, мм	37	28	100	85	129	379
Норма, мм	39	39	63	72	90	303
% от нормы	95	72	158	118	143	125
Температура воздуха, °С	+5,2	+9,3	+10,9	+16,6	+19,8	–
Норма, °С	+0,8	+7,8	+13,4	+17,0	+18,9	–
Отклонение от нормы, °С	+4,4	+1,5	-2,5	-0,4	+0,9	–

Примечание: III – март; IV – апрель; V – май; VI – июнь; VII – июль.

Анализ динамики осадков и температуры воздуха показал, что в 2025 г. за исследуемый период сложились благоприятные условия по влагообеспеченности для роста и развития сельскохозяйственных культур.

Согласно климатическим характеристикам за март–июль менялась и влажность почвы (таблица 2). Раннее начало вегетации в марте сменилось сложными условиями в холодном и переувлажненном мае, что в целом могло негативно сказаться на развитии злаковых культур, несмотря на общий избыток осадков за анализируемое полугодие [15], и что могло влиять на рост и развитие микроорганизмов почвы [16].

Таблица 2 – Коэффициент влажности почвы, %

Срок внесения биопрепарата	к нач.	Фаза кущения		Фаза колошения		Фаза полная спелость	
		к1	о1	к2	о2	к3	о3
осеннее	6,3	7,8	10,1	13,0	15,8	8,7	4,9
весеннее	6,3	–	–	13,0	15,0	8,7	5,2
сроки отбора почвы	28.10.2024	06.05.2025		29.05.2025		17.06.2025	

Колебания значений коэффициента влажности почвы соответствовали климатическим характеристикам анализируемого периода вегетации (таблица 2, 1). Несомненно, важную роль здесь сыграло перераспределение осадков по декадам месяца. В частности, в первой декаде мая отмечали низкий показатель по осадкам, в то время как в последней декаде наблюдали чрезмерное количество осадков [13], [14]. Это сказалось на значении коэффициента влажности почвы, соответственно, равного 7,8–10,1 и 13,0–15,8 %. Июньские образцы почвы характеризовались существенным снижением показателя влажности почвы до 4,9–8,7 % (таблица 2). Хотя за июнь суммарное количество осадков превышало норму и составило 118 % от нормы, но и в этом случае, как и в мае, динамика осадков по декадам месяца существенно различалась, что сказалось на влажности отобранной почвы. Следует подчеркнуть, что именно сведения об осадках дают представление о степени увлажнения почвы в период вегетации растений [17], что также оказывает влияние на жизнедеятельность других представителей эукариот и прокариот.

Численность представителей исследуемого микробоценоза почвы при осеннем внесении биопрепарата Грамисил показана в таблице 3 с учетом распределения по экологическим нишам.

Таблица 3 – Численность представителей микробоценоза почвы при осеннем внесении биопрепарата Грамисил в посевах озимого ячменя, КОЕ/г абс.сух. почвы $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	к нач.	Фаза кушения		Фаза колошения		Фаза полной спелости	
		к1	о1	к2	о2	к3	о3
зимогенная экологическая ниша							
аммонифицирующие	46,6 ± 4,9	21,8 ± 2,0	23,1 ± 2,9	24,6 ± 5,4	23,1 ± 5,7	15,4 ± 2,5	27,0 ± 4,6*
споровые аммонификаторы	2,7 ± 0,3	1,7 ± 0,7	6,0 ± 0,6*	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,2	2,1 ± 0,1	2,5 ± 0,2
амилолитические	86,3 ± 3,1	26,7 ± 2,5	34,2 ± 0,7*	28,8 ± 2,4	38,2 ± 4,7*	29,3 ± 1,5	29,2 ± 0,6
целлюлозолитические	62,1 ± 9,9	47,2 ± 3,9	81,4 ± 6,1*	36,7 ± 2,5	72,2 ± 3,5*	38,9 ± 1,7	44,2 ± 2,2
олиготрофная экологическая ниша							
фосфатмобилизующие	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,2	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,03 ± 0,01*	0,1 ± 0,04	0,1 ± 0,02
олигонитрофильные	34,0 ± 2,4	17,6 ± 2,2	44,3 ± 2,7*	43,2 ± 5,1	56,8 ± 5,4	22,4 ± 1,5	32,8 ± 3,2*
олигокарбофильные	53,3 ± 2,5	48,3 ± 0,8	52,0 ± 2,7	37,8 ± 6,2	54,9 ± 5,3*	34,0 ± 2,1	38,6 ± 6,7
автохтонная экологическая ниша							
автохтонные	52,4 ± 8,0	20,4 ± 2,8	45,9 ± 3,2*	32,8 ± 3,4	32,3 ± 5,0	24,8 ± 4,5	31,1 ± 3,9
миксотрофно-синтетическая экологическая ниша							
микромитеты, $\times 10^3$	52,1 ± 1,6	31,6 ± 2,9	34,8 ± 4,3	42,6 ± 6,5	34,9 ± 1,2	64,2 ± 6,2	22,4 ± 0,4*

Примечание: *статистически достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с соответствующим контролем.

При анализе представителей зимогенной экологической ниши отмечено, что препарат Грамисил стимулирует рост отдельных групп микроорганизмов в опытных образцах отобранной почвы, либо не оказывает никакого влияния. Аналогичный результат по зимогенной экологической нише был выявлен в исследованиях Грамисила в предыдущем вегетационном периоде [5]. По олиготрофной и автохтонной экологическим нишам получены результаты, также указывающие на стимулирующий эффект тестируемого препарата. Отмечено единственное исключение для почвенного образца, отобранного в фазу колошения в отношении фосфатмобилизующих бактерий.

Данные по средним значениям КОЕ/г для представителей анализируемых экологических ниш микроорганизмов почвы при весеннем внесении биопрепарата Грамисил в посевах озимого ячменя представлены в таблице 4.

На начальном этапе превращения свежей органической биомассы отмечено существенное влияние изучаемого биопрепарата на увеличение численности в образцах почвы, отобранных в фазе полной спелости ячменя, по споровым аммонификаторам в 10 раз и целлюлозолитическим аэробным бактериям в 1,4 по сравнению с соответствующим контролем (таблица 4).

В отношении олиготрофной экологической ниши отмечен существенный позитивный эффект Грамисила по увеличению численности фосфатмобилизующих бактерий в опытных образцах почвы, отобранных в фазе колошения и фазе полной спелости ячменя, и олигокарбофильных бактерий в опытном почвенном образце, отобранном в фазе колошения. В упомянутом образце почвы в тоже время установлено статистически достоверное понижение численности представителей группы олигонитрофильных бактерий, которая включает азотфиксаторы.

Таблица 4 – Численность представителей микробоценоза почвы при весеннем внесении биопрепарата Грамисил в посевах озимого ячменя, КОЕ/г абс.сух. почвы $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	к нач.	Фаза колошения		Фаза полная спелость	
		к2	о2	к3	о3
зимогенная экологическая ниша					
аммонифицирующие	46,6 ± 4,9	24,6 ± 5,4	31,1 ± 3,0	15,4 ± 2,5	19,3 ± 2,3
споровые аммонификаторы	2,7 ± 0,3	2,4 ± 0,1	2,1 ± 0,4	2,1 ± 0,1	21,4 ± 1,5*
амилолитические	86,3 ± 3,1	28,8 ± 2,4	30,8 ± 3,3	29,3 ± 1,5	27,5 ± 0,5
целлюлозолитические	62,1 ± 10,1	36,7 ± 2,5	33,7 ± 6,7	38,9 ± 1,7	51,2 ± 4,7*
олиготрофная экологическая ниша					
фосфатмобилизующие	0,7 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,7 ± 0,1*	0,1 ± 0,04	0,2 ± 0,02*
олигонитрофильные	34,0 ± 2,4	43,2 ± 5,1	27,1 ± 2,6*	22,4 ± 1,5	29,1 ± 2,1
олигокарбофильные	53,3 ± 2,5	37,8 ± 6,2	52,6 ± 2,3*	34,0 ± 2,1	38,4 ± 3,3
автохтонная экологическая ниша					
автохтонные	52,4 ± 8,0	32,8 ± 3,4	19,7 ± 3,9*	24,8 ± 4,5	42,8 ± 11,1*
миксотрофно-синтетическая экологическая ниша					
микромитеты, $\times 10^3$	52,1 ± 1,6	42,6 ± 6,5	22,0 ± 1,1 *	64,2 ± 6,2	19,3 ± 5,1*

Примечание: *статистически достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с соответствующим контролем.

Касательно группы олиготрофов было выявлено существенное снижение численности ее представителей в опытных образцах почвы в 1,3 раза по сравнению с контрольным образцом, отобранных в фазе колошения ячменя, и существенное повышение в 1,7 раза в образцах, отобранных в фазе полная спелость.

В отношении микромицетов установлено их достоверное снижение по численности в опытных образцах почвы по сравнению с контролем, отобранных в фазе колошения и в фазе полная спелость, соответственно, в 2–3 раза.

Необходимо подчеркнуть следующую особенность в распределении численности тестируемых групп микроорганизмов, наблюдаемую в полевом эксперименте: вне вегетационного периода (в октябре) отмечена достоверно большая численность, до 1,5–3 раз, представителей аммонифицирующих и амилалитических микроорганизмов по сравнению с их количеством в вегетационный период (таблица 3, 4).

Проанализируем влияние сроков внесения биопрепарата Грамисил (осенний (таблица 3) и весенний сроки (таблица 4)) на количественный состав и качественный спектр представителей почвенного микробоценоза в образцах почвы, отобранных в фазах колошения и полной спелости озимого ячменя.

В отношении почвы, отобранной в фазе колошения, отмечено после фазы кушения продолжение активации процессов разложения первичной органической биомассы представителями амилалитической и целлюлозолитической групп в опытном образце при осеннем внесении биопрепарата в почву, на что указывает достоверное увеличение численности упомянутых микроорганизмов. В опытных образцах, отобранных в фазе полной спелости, независимо от сроков внесения Грамисила, выявлен позитивный эффект биопрепарата, что сказалось на существенном повышении показателя КОЕ/г в отношении отдельных групп микроорганизмов, либо значения показателя оставались на уровне контроля.

Касательно олиготрофной экологической ниши установлено, что при осеннем внесении биопрепарата достоверно увеличивается количество представителей олигокарбофильной группы микроорганизмов в 1,5 раза. Аналогичный результат получен и для опытного почвенного образца при весеннем внесении биопрепарата. Ожидаемый результат выявлен в отношении фосфатмобилизующих бактерий. При осеннем внесении Грамисила, который включает в своем составе *Pseudomonas brassicacearum* БИМ И-1917Д (фосфатмобилизующий штамм) [1], [2], отмечено в почвенном образце, отобранном в фазе колошения, достоверное снижение численности фосфатмобилизующих бактерий в 6,7 раза, в то время как при весеннем внесении биопрепарата определено достоверное повышение их численности в 3,5 раза. Полученный результат можно объяснить свежим внесением весной в почву фосфатмобилизующего штамма в составе биопрепарата. Однако в отношении олигонитрофильных микроорганизмов, представленных в основном азотфиксаторами, получен противоположный результат. При осеннем внесении Грамисила численность олигонитрофильных микроорганизмов в опытном образце сопоставима с контрольным значением, при весеннем внесении биопрепарата – существенно понижается в 1,6 раза. Здесь необходимо упомянуть о включении в состав Грамисила азотфиксирующего штамма *Rahnella aquatilis* В-1916Д [1], [2], однако, во-первых, функционирование бактерий упомянутого штамма зависит от наличия в почве других форм азота, в первую очередь в аммонийной форме, во-вторых, в образцах почвы, отобранной в фазе полной спелости, численность азотфиксаторов в опытном образце сопоставима с результатами контроля.

Осеннее внесение Грамисила не оказывает влияние на численность представителей автохтонной экологической ниши в опытных образцах почвы по сравнению с контрольным значением, независимо от сроков отбора почвы. При весеннем внесении препарата в опытном образце почвы, отобранном в фазе колошения, отмечено существенное снижение численности микроорганизмов по сравнению с контрольным образцом в 1,9 раза, а в фазе полной спелости выявлено достоверное повышение количества микроорганизмов в 3,3 раза.

Касательно микромицетов, представляющих миксотрофно-синтетическую экологическую нишу, в опытных образцах, независимо от сроков внесения биопрепарата и сроков отбора почвы, установлено уменьшение, в том числе достоверное, их численности. Такие значения КОЕ/г указывают на подавление процессов трансформации всевозможных компонентов органического вещества почвы и снижение продуцирования пигментов гумусовых соединений.

Проанализируем влияние биопрепарата Грамисил на эколого-трофические индексы и коэффициенты (таблица 5).

Таблица 5 – Влияние биопрепарата Грамисил на эколого-трофические индексы и коэффициенты

Показатели	К нач.	Фаза кущения		Фаза колошения				Фаза полная спелость			
		к1о	о1о	к2о	о2о	к2в	о2в	к3о	о3о	к3в	о3в
коэффициент минерализации	1,9	1,2	1,5	1,2	1,7	1,2	1,0	1,9	1,1	1,9	1,4
индекс олиготрофности	1,1	2,2	2,3	1,5	2,4	1,5	1,7	2,2	1,4	2,2	2,0
коэффициент педотрофности	1,1	0,9	2,0	1,3	1,4	1,3	0,6	1,6	1,2	1,6	2,2
P_m – коэф. трансформации	71,7	108,6	65,6	113,8	58,7	113,8	99,9	70,0	90,0	70,0	68,0

Примечание: о – осеннее внесение биопрепарата; в – весеннее внесение биопрепарата.

При осеннем внесении Грамисила в опытных образцах почвы отмечено усиление иммобилизационных процессов, отобранных в фазе колошения, об этом свидетельствует показатель коэффициента минерализации, равный 1,7 (в контроле – 1,2). В опытном образце, отобранном в фазе полная спелость, минерализационные и иммобилизованные процессы в исследуемом агроценозе протекают с равной степенью интенсивности, в то время как в контрольном образце доминируют минерализационные процессы.

При весеннем внесении Грамисила в образцах почвы (и контрольном, и опытном), отобранных в фазе колошения, процессы иммобилизации и минерализации уравновешены, в то время как в почвенных образцах, отобранных в фазе полной спелости, сохраняется такая же тенденция, которая установлена для осеннего внесения биопрепарата.

Значение индекса олиготрофности Аристовской, установленном при изучении почвенных образцов опытных вариантов, вне зависимости от сроков внесения биопрепарата Грамисил, указывает на одинаковую направленность процессов (таблица 5), что согласуется с результатами прошлогоднего исследования [5]. На стадии колошения в опытных вариантах почвы по сравнению с контролем замедляются процессы деструкции органического вещества. В тоже время для опытных почвенных образцов, отобранных в фазе полной спелости, отмечена интенсификация процессов деструкции, что может свидетельствовать о переходе изучаемого микробоценоза в более устойчивое состояние, близкое к состоянию климаксовой системы. Следует упомянуть, что олиготрофная часть исследуемого почвенного микробоценоза принимает участие в превращении промежуточной биомассы до структур специфического органического вещества, включающих негидролизуемые остатки, фульвокислоты, гумины.

Относительно коэффициента педотрофности выявлен разный ответ на сроки внесения Грамисила: при осеннем внесении значения показателя в опыте и контроле практически не различаются в обоих сроках отбора, в то время как при весеннем внесении при отборе почвы в фазу колошения в опытном образце значение равно 0,6 (в контроле 1,3), в фазу полной спелости – 2,2 (в контроле 1,6). Данные цифры указывают, что при обработке Грамисилом в фазе колошения активность автохтонной части микробонаселения существенно уменьшается, а в фазу полной спелости – возрастает. И в последнем случае значение индекса педотрофности, равное 2,2 указывает, что исследуемый агроценоз обладает большей устойчивостью к негативным антропогенным воздействиям по сравнению с контролем. В данный период замедление процессов преобразования органического вещества промежуточной стадии разложенности определяет снижение активности процессов превращения неспецифической органической части почвы через реакции поликонденсации и полимеризации в гумусовые вещества почвы.

Значение коэффициента трансформации свидетельствует, что в опытных образцах, отобранных в фазе колошения, интенсивность трансформации понижается по сравнению с контролем при обоих сроках внесения препарата. В тоже время в образцах, отобранных в фазе полной спелости, независимо от сроков внесения Грамисила, процесс трансформации находится на уровне контроля или превышает его.

Заключение. На основании выполненного микробиологического исследования микробного препарата Грамисил, используемого для прикорневой подкормки в фазе кущения (в двух сроках: осенний и весенний периоды) в посевах озимого ячменя, выращиваемого на дерново-подзолистой почве юго-восточного региона республики, установлено: значения ко-

эффициента трансформации свидетельствуют, что независимо от сроков внесения биопрепарата, в опытных образцах, отобранных в фазе колошения, интенсивность превращения азот-содержащих соединений уменьшается по сравнению с контролем. В тоже время в образцах, отобранных в фазе полной спелости, независимо от сроков внесения Грамисила, процесс трансформации находится на уровне контроля или превышает его.

Значение индекса олиготрофности вне зависимости от сроков внесения биопрепарата Грамисил для опытных образцов указывает на одинаковую направленность процессов и соответствует результатам прошлогоднего исследования. На стадии колошения в опытных образцах почвы по сравнению с контролем тормозятся процессы деструкции органического вещества. В тоже время для опытных почвенных образцов, отобранных в фазе полной спелости, отмечено усиление процессов деструкции, что может подтверждать переход тестируемого микробоценоза в состояние климаксовой системы.

Литература

1. Грамисил. – URL: <https://inmi.by/2023/09/06/gramisil/> (дата обращения: 28.05.2025).
2. Препарат микробный «Грамисил», ж. – URL: <https://pesticydyby/mikrobiologischeskie-udobreniya/preparat-mikrobnuyj-gramisil-zh/> (дата обращения: 28.05.2025).
3. Timofeeva, A. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture / A. Timofeeva, M. Galyamova, S. Sedykh // *Plants*. – 2022. – № 11. – P. 2119.
4. Чернова, Т. И. Управление почвенными микробными сообществами: возможности и перспективы / Т. И. Чернова, М. В. Семенова // *Почвоведение*. – 2021. – № 12. – С. 1506–1522.
5. Концевая, И. И. Влияние биопрепарата Грамисил в посевах озимого ячменя на агрономически ценные группы почвенных микроорганизмов / И. И. Концевая, Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев [и др.] // *Известия ГГУ им. Ф. Скорины*. – 2025. – № 3 (150). – С.25–31.
6. Растениеводство. Практикум: учебно-методическое пособие / В. Г. Тарануха [и др.]. – Горки : БГСХА, 2023. – 373 с.
7. Прудникова, С. В. Методы микрoэкологического исследования наземных, водных и воздушных экосистем: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / С. В. Прудникова [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2007. – 152 с.
8. Вильдфлуш, И. Р. Практикум по агрохимии / И. Р. Вильдфлуш [и др.]. – Минск : Ураджай, 1998. – 270 с.
9. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений : ГОСТ 28268-89 ; введ. 06.09.1990. – М. : Стандартинформ, 2006. – 6 с.
10. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: науч. метод. пособ. / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.
11. Зинченко, М. К. Влияние известкования на численность эколого-трофических групп микроорганизмов в серой лесной почве / М. К. Зинченко, С. И. Зинченко // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 7. – С. 43–47.
12. Доспехов, Б. А. Практикум по земледелию: учеб. для ун-тов / Б. А. Доспехов, И. П. Васильев, А. М. Туликов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 58 с.
13. Климатическая характеристика весеннего сезона 2025 года. – URL: <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-vesennego-sezona-2025-goda-9949-2025/> (дата обращения: 05.10.2025).
14. Климатическая характеристика летнего сезона 2025 года. – URL: <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-letnego-sezona-2025-goda-10625-2025/> (дата обращения: 05.10.2025).
15. Растениеводство: учеб. для вузов / Г. С. Посыпанов [и др.]. – М., 2022. – 612 с.
16. Концевая, И. И. Влияние микробных удобрений на взаимоотношения основных эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов в посевах ярового ячменя в условиях засухи / И. И. Концевая [и др.] // *Известия ГГУ им. Ф. Скорины*. – 2024. – № 3 (144). – С. 46–51.
17. Найденов, А. С. Почвенная влага (принципы и пути регулирования водного режима почвы) : учеб. пособ. / А. С. Найденов, В. П. Василько, С. С. Терехова. – Краснодар : КубГАУ, 2020. – 77 с.

Влияние зараженности метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* (Nordmann, 1832) на упитанность молоди карповых рыб в пойменном водоеме бассейна р. Припять

Н.А. ЛЕБЕДЕВ¹, А.А. РАДКЕВИЧ², А.В. КРУК¹

Проведена оценка влияния интенсивности инвазии метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* на упитанность красноперки *Scardinius erythrophthalmus* и плотвы обыкновенной *Rutilus rutilus* в пойменном водоеме бассейна р. Припять вблизи д. Велавск. Выявлена обратная корреляционная связь между интенсивностью инвазии метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* и коэффициентами упитанности по Фультону и Кларк у молоди красноперки и плотвы обыкновенной. Для молоди красноперки коэффициент корреляции Спирмена между интенсивностью инвазии метацеркариями и показателем упитанности по Кларк составил $-0,830$ ($p < 0,001$), что свидетельствует о наличии высокой статистически значимой связи. У молоди плотвы связь между аналогичными показателями была слабой и находилась на пороге статистической значимости: коэффициент корреляции Спирмена составил $-0,42$ ($p = 0,051$). Полученные данные могут свидетельствовать о существовании видовой специфичности воздействия метацеркариев *Posthodiplostomum cuticola* на упитанность молоди карповых рыб. При высокой интенсивности инвазии отмечены заметные изменения в окраске молоди рыб, повышающие их уязвимость перед хищниками.

Ключевые слова: Cyprinidae, коэффициент упитанности по Кларк, постодиплостомоз, *Posthodiplostomum cuticola*, интенсивность инвазии, метацеркарии, плотва обыкновенная *Rutilus rutilus*, красноперка *Scardinius erythrophthalmus*.

An assessment was performed on the impact of the invasion intensity of *Posthodiplostomum cuticola* metacercariae on the body condition of the rudd (*Scardinius erythrophthalmus*) and the common roach (*Rutilus rutilus*) in a floodplain waterbody of the Pripyat River basin near the village of Velavsk. An inverse correlation was established between the intensity of *Posthodiplostomum cuticola* metacercariae invasion and the Fulton and Clark condition factors in juvenile rudd and common roach. For juvenile rudd, Spearman's rank correlation coefficient between the intensity of metacercariae invasion and the Clark condition factor was $-0,830$ ($p < 0,001$), indicating a strong, statistically significant relationship. In juvenile roach, the relationship between the same parameters was weak: Spearman's rank correlation coefficient was $-0,420$ ($p = 0,051$). The obtained data may indicate the existence of species-specific effects of *Posthodiplostomum cuticola* metacercariae on the body condition of juvenile cyprinid fish. Additionally, at high invasion intensities, marked changes in the coloration of juvenile fish were observed, increasing their vulnerability to predators.

Keywords: Cyprinidae, Clark's condition factor, postodiplostomosis, *Posthodiplostomum cuticola*, invasion intensity, metacercariae, *Rutilus rutilus*, *Scardinius erythrophthalmus*.

Введение. Одним из широко распространенных заболеваний карповых рыб, обитающих в естественных водоемах и водотоках Европы, является постодиплостомоз (чернопятнистая болезнь) [1]. Эта болезнь также встречается у карповых рыб, являющихся объектами аквакультуры в прудовых хозяйствах. Особую опасность постодиплостомоз представляет для особей младших возрастных групп, поскольку в этот период жизни рыбы наиболее уязвимы к воздействию паразитов. Возбудителем заболевания у рыб являются метацеркарии *Posthodiplostomum cuticola*, заключенные в подкожной клетчатке, плавниках и некоторых других частях тела в цисты. Внешне постодиплостомоз проявляется появлением на теле рыб черных пятен и бугорков, образующихся из-за отложения пигмента гемомелонина в местах локализации метацеркариев [2]. При высокой интенсивности инвазии у молоди наблюдается замедление роста, деформация тела, включая искривление позвоночника, снижается выживаемость. В отдельных водоемах экстенсивность инвазии может достигать 100 % [3]. Современные данные по заболеваемости постодиплостомозом молоди карповых рыб в бассейне р. Припять фрагментарны. Имеются лишь отдельные исследования, посвященные оценке зараженности паразитами рыб, обитающих в водотоках и водоемах Полесского государственного радиационно-экологического

заповедника [4]. Вопрос о степени влияния метацеркариев *Posthodiplostomum cuticola* на показатели упитанности молоди карповых рыб в научной литературе освещен недостаточно полно, а имеющиеся публикации носят противоречивый характер. Одной из немногих работ, непосредственно посвященных данной проблематике, являются исследования хорватских ученых S. Zrnčić et al. [5]. Исследователями было установлено, что наиболее высокая экстенсивность инвазии метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* наблюдалась у плотвы обыкновенной, чебачка амурского, уклейки, ельца, несколько меньшая – у голавля, существенно более низкая у горчачка обыкновенного. Для оценки корреляционной связи между интенсивностью инвазии и коэффициентом упитанности по Фультону авторами был выбран коэффициент корреляции Пирсона, показавший статистическую значимость только для голавля ($r = 0,50$ при $p = 0,0031$), но не для плотвы ($p > 0,05$). Вместе с тем авторы обращают внимание, что, вероятнее всего, отсутствие корреляции между анализируемыми показателями у плотвы обыкновенной объясняется малым числом (всего 5) экземпляров в выборке. Между тем коэффициенты упитанности по Фультону и Кларк часто используют в прудовом рыбоводстве для оценки подготовленности сеголетков рыб к зимовке, а также в селекционной работе как один из экстерьерных индексов. При низких значениях коэффициентов упитанности сеголетков прудовых рыб принимаются соответствующие технологические решения (продление кормления и др.). В этой связи целью работы стало определение влияния интенсивности зараженности метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* на показатели упитанности молоди красноперки *Scardinius erythrophthalmus* (Linnaeus, 1758) и плотвы обыкновенной *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) в пойменном водоеме бассейна р. Припять.

Материалы и методы исследований. Отлов молоди рыб проведен в конце августа–начале сентября 2024 г. в пойменном водоеме р. Припять (рисунок 1), расположенном вблизи д. Велавск Мозырского района. Дно водоема песчано-илистое, берега песчаные, местами заболоченные, со стороны р. Припять низкие, с противоположной стороны с обрывистыми участками. Водная и прибрежно-водная растительность типична для водоемов поймы Припяти, развита хорошо.



Рисунок 1 – Участки отлова молоди рыб в пойменном водоеме р. Припять, август–сентябрь 2024 г.

В весенний период 2024 г. уровни весенних паводковых вод на р. Припять были выше средних многолетних значений, что привело к затоплению прилегающих к водоему участков (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пойменный водоем бассейна р. Припять, май 2024 г.

В качестве орудия лова использована подъемная сетка размером 1 × 1 метр и шагом ячеи до 10 мм. Всего было поймано 74 экземпляра молоди двух видов карповых: красноперки *Scardinius erythrophthalmus* (52 экз.) и плотвы обыкновенной *Rutilus rutilus* (22 экз.). В водоеме встречаются и иные виды рыб: горчак обыкновенный *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782), густера *Blicca bjoerkna* (Linnaeus, 1758), щука *Esox lucius* (Linnaeus, 1758), окунь речной *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758) и некоторые другие. Из-за относительно небольшого количества отловленных особей и низкой интенсивности инвазии анализ по этим видам рыб не проводился. Так, у горчака обыкновенного в 2024 г. выявлено только 5 зараженных метацеркариями особей, амплитуда интенсивности составила 1–5, индекс обилия – 2,4 экз./рыбу. Все отловленные рыбы предварительно осматривались на наличие характерных черных пигментных пятен [6]; подсчет цист с заключенными в них метацеркариями проводился микроскопически. Количественно зараженность рыб чернопятнистой болезнью оценивали на основании интенсивности инвазии, экстенсивности инвазии и индекса обилия. У отловленных особей измеряли длину без С (далее длина) и массу тела. Упитанность определяли по классическим формулам Фультона [7] и Кларк. Оценка половой зрелости проведена при вскрытии рыбы с использованием шкалы зрелости гонад для карповых рыб [7]. Поскольку отловленные особи не достигли половой зрелости, все показатели анализировались без разделения собранного материала по полу. Статистическая обработка данных выполнена в пакете Statistica 7. На первом этапе была проведена проверка интенсивности инвазии, коэффициентов упитанности по Фультону и Кларк на нормальность распределения с помощью теста Шапиро-Уилка. Данные по коэффициентам упитанности по Фультону и Кларк в основном соответствовали нормальному распределению, а интенсивность инвазии нет. Поэтому для установления связи между интенсивностью инвазии и показателями упитанности по Фультону и Кларк по всей выборке рыб применены коэффициенты корреляции Спирмена. В статье приняты следующие обозначения: $M \pm m$ – средняя арифметическая величина и ее ошибка; r_s – коэффициент ранговой корреляции Спирмена; t – критерий для оценки статистической значимости коэффициента корреляции; df – число степеней свободы. Пороговый уровень статистической значимости принимался при $p < 0,05$. Корреляционная связь от 0,901 до 0,999 считалась очень сильной, от 0,701 до 0,900 – сильной, от 0,501 до 0,700 – средней, от 0,301 до 0,500 – слабой, от 0 до 0,300 – отсутствующей.

Результаты исследований и их обсуждение. Всего было отловлено 23 здоровые особи красноперки длиной от 39 до 64 мм (в среднем $50,13 \pm 1,15$ мм) и 29 зараженных длиной от 40 до 77 мм (в среднем $54,90 \pm 1,76$ мм) (таблица 1). Рыбы, инвазированные метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola*, имели несколько большую длину при меньшей массе, чем здоровые. Экстенсивность инвазии у красноперки составила 56 %, интенсивность инвазии варьировала в широком диапазоне – от 3 до 34 метацеркариев на рыбу [8], а индекс обилия достиг 8,6 экз./рыбу. Среди отловленных особей половозрелых экземпляров не выявлено. Согласно П.И. Жукову [9], половозрелость красноперки обычно наступает в возрасте 3–4 года при длине около 10 см. Коэффициенты упитанности по Фультону и Кларк у здоровых и зараженных постодиплостомозом особей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели упитанности у здоровых и зараженных метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* особей красноперки *Scardinius erythrophthalmus* в пойменном водоеме р. Припять, август–сентябрь 2024 г.

Показатели	Здоровые особи красноперки, 23 экз.		Зараженные особи красноперки, 29 экз.	
	min–max	$M \pm m$	min–max	$M \pm m$
Длина без С, мм	39–64	$50,13 \pm 1,15$	40–77	$54,90 \pm 1,76$
Масса, г	1,44–5,80	$2,69 \pm 0,22$	1,11–7,43	$2,48 \pm 0,21$
Ку (Ф)	1,80–2,43	$2,05 \pm 0,04$	1,61–1,88	$1,72 \pm 0,01$
Ку (К)	1,57–2,24	$1,77 \pm 0,04$	1,12–1,63	$1,44 \pm 0,03$

Коэффициент упитанности по Фультону у здоровых особей красноперки варьировал от 1,80 до 2,43 (в среднем $2,05 \pm 0,04$) и был выше на 19,2 % по сравнению с аналогичным показателем у зараженных экземпляров (в среднем $1,72 \pm 0,01$ с колебаниями от 1,61 до 1,88). Ко-

эффицент упитанности по Кларк также был выше у здоровых рыб на 22,9 % по сравнению с зараженными (в среднем $1,77 \pm 0,04$ и соответственно $1,44 \pm 0,03$). У отдельных особей с высокой интенсивностью инвазии отмечено изменение окраски за счет появления и слияния черных пятен (рисунок 3) в местах локализации метацеркариев.



Рисунок 3 – Черные пигментные пятна на теле красноперки (вид сбоку и сверху), август 2024 г.

Поскольку плотва обыкновенная и красноперка имеют маскирующую окраску (темно-зеленую или темно-бурую спинку с серебристыми боками) [9], то появление на теле черных пятен делает их более заметными для хищников, включая рыбоядных птиц. Это согласуется с гипотезой паразитарной манипуляции, в соответствии с которой механизм индуцирования метацеркариями образования черных пятен, а также изменения поведения возник в ходе эволюции как адаптация для усиления трофической передачи паразита через промежуточных к дефинитивным хозяевам [10], [11]. В случае постодиплостомоза первым промежуточным хозяином выступают брюхоногие моллюски рода *Planorbis*, вторым – пресноводные рыбы преимущественно семейства *Cyprinidae*, дефинитивными хозяевами являются различные виды цапель и другие рыбоядные птицы.

Данные корреляционного анализа связи между интенсивностью инвазии и коэффициентами упитанности по Фультону и Кларк у красноперки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа корреляционной связи между интенсивностью инвазии метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* и коэффициентами упитанности у красноперки *Scardinius erythrophthalmus* в пойменном водоеме р. Припять

Показатели	Коэффициент упитанности по Фультону	Коэффициент упитанности по Кларк
r_s	-0,822	-0,830
t	-10,21	-10,51
df	50	50
Уровень значимости (p)	< 0,001	< 0,001
Сила и направление связи	сильная обратная связь	сильная обратная связь

Между интенсивностью инвазии и коэффициентами упитанности у молоди красноперки выявлена статистически значимая ($p < 0,001$) сильная обратная корреляционная связь. Так, коэффициент корреляции Спирмена между интенсивностью инвазии постодиплостомозом и показателем упитанности по Фультону составил -0,822, по Кларк – -0,830. Таким образом, оба коэффициента упитанности достаточно информативны и могут использоваться для оценки влияния зараженности метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* на упитанность молоди.

Показатели упитанности плотвы обыкновенной из пойменного водоема р. Припять представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели упитанности плотвы обыкновенной *Rutilus rutilus* в пойменном водоёме р. Припять, август–сентябрь 2024 г.

Показатели	Здоровые особи плотвы обыкновенной, 10 экз.		Зараженные особи плотвы обыкновенной, 12 экз.	
	min–max	$M \pm m$	min–max	$M \pm m$
Длина без С, мм	43–62	$50,5 \pm 1,88$	48–75	$55,5 \pm 2,54$
Масса, г	1,32–3,78	$2,12 \pm 0,28$	1,13–6,04	$2,36 \pm 0,45$
Ку (Ф)	1,41–1,90	$1,57 \pm 0,05$	0,87–1,51	$1,22 \pm 0,06$
Ку (К)	1,16–1,77	$1,39 \pm 0,05$	0,72–1,43	$1,10 \pm 0,07$

Всего было отловлено и исследовано 10 здоровых и 12 зараженных метацеркариями особей плотвы обыкновенной (таблица 3). Экстенсивность инвазии достигла 55 %, интенсивность инвазии колебалась в диапазоне от 2 до 60 метацеркариев на особь [9], индекс обилия составил 6,6 экз./рыбу. Все отловленные экземпляры не достигли половой зрелости, что соответствует данным П.И. Жукова [9], согласно которым половозрелость плотвы наступает при длине тела не менее 80 мм. Длина здоровых особей плотвы варьировала в пределах от 43 до 62 мм при средней $50,5 \pm 1,88$ мм; у зараженных метацеркариями экземпляров – от 48–75 мм (в среднем $55,5 \pm 2,54$). Таким образом, как и в случае с красноперкой незараженные особи плотвы несколько уступали в длине зараженным. Напротив, коэффициент упитанности по Фультону у здоровых особей ($1,57 \pm 0,05$) был выше на 28,7 % по сравнению с зараженными ($1,22 \pm 0,06$); коэффициент упитанности по Кларк соответственно – на 26,4 % ($1,39 \pm 0,05$ и $1,10 \pm 0,07$).

Результаты корреляционного анализа для зараженных особей обыкновенной плотвы представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты корреляционного анализа связи коэффициентов упитанности и интенсивности инвазии метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* у зараженных особей плотвы *Rutilus rutilus*

Показатели	Коэффициент упитанности по Фультону	Коэффициент упитанности по Кларк
r_s	-0,557	-0,420
t	-3,00	-2,07
df	20	20
Уровень значимости (p)	< 0,007	< 0,051
Сила и направление связи	средняя обратная связь	слабая обратная связь

У плотвы обыкновенной установлены обратные корреляции между интенсивностью инвазии и коэффициентом упитанности по Фультону (связь статистически значима при $p < 0,007$) и на пороге статистической значимости для коэффициента упитанности по Кларк ($p = 0,051$). Для показателя упитанности по Фультону коэффициент корреляции Спирмена составил -0,557 (средняя обратная связь), по Кларк – -0,420 (слабая обратная связь).

Таким образом, у молоди плотвы обыкновенной по сравнению с красноперкой корреляционная связь между анализируемыми показателями была слабее, что может свидетельствовать о существовании видовых различий по устойчивости к воздействию на организм метацеркариев *Posthodiplostomum cuticola* при сходной длине, экстенсивности и интенсивности инвазии.

Заключение. В пойменном водоеме р. Припять вблизи д. Велавск выявлен очаг постодиплостомоза, характеризующийся устойчивостью и относительно высокими показателями экстенсивности и интенсивности инвазии у молоди красноперки и плотвы обыкновенной. Для красноперки в августе-сентябре 2024 г. экстенсивность инвазии метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* составила 56 %, амплитуда интенсивности – 3–34, индекс обилия – 8,6 экз./рыбу. Для плотвы обыкновенной эти показатели составили соответственно – 55 %, 2–60 и 6,6 экз./рыбу. И для красноперки и плотвы обыкновенной отмечено, что зараженные особи имели несколько большую длину по сравнению со здоровыми экземплярами. Возможно, некоторые различия в длине между здоровыми и зараженными особями обусловлены действием естественного отбора: более мелкие особи, зараженные метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola*, элиминируются чаще и быстрее, чем крупные, поэтому их доля в уловах ниже. Впрочем, существует и другое альтернативное объяснение. По мнению Ondračková M. et al. [10], установленный ими эффект усиления роста у зараженных возбудителем *Posthodiplostomum cuticola* карповых рыб служит для усиления передачи паразита в трофических цепях и объясняется в рамках гипотезы паразитарной манипуляции. Другие исследователи [12], напротив, сообщают о комплексном негативном воздействии метацеркариев *Posthodiplostomum cuticola* на рыбу. В частности, в ходе эксперимента установлены патологические изменения в дыхательной и выделительной системах, печени; также отмечена отечность и полное разрушение мышечных волокон в местах локализации паразитов, что приводило к нарушениям двигательной активности [12]. Это согласуется с результатами наших исследований, согласно которым у здоровой молоди красноперки и плотвы обыкновен-

ной коэффициенты упитанности были выше, чем у зараженных метацеркариями экземпляров. Оба коэффициента могут использоваться для анализа воздействия метацеркариев *Posthodiplostomum cuticola* на упитанность молоди карповых рыб.

Корреляционный анализ выявил статистически значимые обратные корреляции между интенсивностью инвазии и показателями упитанности у красноперки и плотвы обыкновенной. Для молоди красноперки коэффициент корреляции Спирмена составил $-0,830$ ($t = -10,51$; $df = 50$; $p < 0,001$). У молоди плотвы связь между интенсивностью инвазии метацеркариями постодиплостомоза и показателем упитанности по Кларк была слабой и находилась на пороге статистически значимой: коэффициент корреляции Спирмена составил всего $-0,42$ ($t = -2,07$; $df = 20$; $p = 0,051$). Отличия в силе, но не характере связи у красноперки и плотвы обыкновенной могут свидетельствовать о существовании видовой специфичности влияния метацеркариев *Posthodiplostomum cuticola* на упитанность молоди карповых рыб. При высокой интенсивности инвазии отмечены заметные изменения в окраске молоди рыб, повышающие их уязвимость перед хищниками. Вместе с тем, учитывая противоречивость существующих в научной литературе данных, необходимо продолжение и расширение исследований по этому вопросу.

Литература

1. Романова, Н. Н. Фауна трематод рыб в водохранилищах европейской части России / Н. Н. Романова, Н. А. Головина, А. А. Вишторская // Российский паразитологический журнал. – 2023. – № 17 (1). – С. 28–42.
2. Negrea, O. Some investigations on incidence and infestation level in Cyprinid posthodiplostomosis / O. Negrea [et al.] // Bulletin UASVM Animal Science and Biotechnologies. – 2015. – Vol. 72, № 2. – P. 203–206.
3. Козлова, Т. В. Ихтиопатология / Т. В. Козлова, Е. Л. Микулич, А. И. Козлов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2018. – 276 с.
4. Юрченко, И. С. Видовое разнообразие паразитов рыб, обитающих в водоемах и водотоках Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / И. С. Юрченко // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2020. – № 3 (120). – С. 99–104.
5. Zrnčić, S. First observation of *Posthodiplostomum cuticola* (Nordmann, 1832) metacercariae in cypriniformes from Croatia / S. Zrnčić, D. Oraić, Ž. Mihaljević [et al.] // Helminthologia. – 2009. – Vol. 46, № 2. – P. 112–116.
6. Быховская-Павловская, И. Е. Паразиты рыб : Руководство по изучению / И. Е. Быховская-Павловская. – Л. : Наука : Ленингр. отделение, 1985. – 123 с.
7. Правдин, И. Ф. Руководство по изучению рыб / И. Ф. Правдин. – М. : Пищевая промышленность, 1966. – 376 с.
8. Лебедев, Н. А. Зараженность молоди красноперки и плотвы метацеркариями *Posthodiplostomum cuticola* в пойменном водоеме бассейна реки Припять / Н. А. Лебедев, А. А. Радкевич, А. В. Крук // Экологические аспекты устойчивого развития Белорусского Полесья и сопредельных территорий : Международная научно-практическая конференция, Гомель, 2–3 октября 2025 г. : сб. матер. / М-во образования Респ. Беларусь, ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол. : Н. А. Лебедев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – С. 58–61.
9. Жуков, П. И. Рыбы Беларуси / П. И. Жуков. – Минск : Наука и техника, 1965. – 415 с.
10. Ondračková, M. Seasonal dynamics of *Posthodiplostomum cuticola* (Digenea, Diplostomatidae) metacercariae and parasite-enhanced growth of juvenile host fish / M. Ondračková, M. Reichard, P. Jurajda [et al.] // Parasitology Research. – 2004. – Vol. 93, № 2. – P. 131–136.
11. Lafferty, K. D. Altered behaviour of parasitized killifish increases susceptibility to predation by bird final hosts / K. D. Lafferty, A. K. Morris // Ecology. – 1996. – Vol. 77, № 5. – P. 1390–1397.
12. Терпугова, Н. Ю. Постодиплостомоз ранней молоди воблы / Н. Ю. Терпугова, М. П. Грушко, Н. Н. Федорова // Ветеринария. – 2022. – № 3. – С. 45–49.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Гимназия г. Калинковичи

Информатика

УДК 004.8:378

EDN: IJVSQJ

Гибридная архитектура цифрового наставника: онтология жизненных компетенций, NLP-анализ диалогов и кластеризация траекторий взросления

Е.М. БЕРЕЗОВСКАЯ, В.В. КОЗЛИКОВСКАЯ

В статье рассматривается гибридная архитектура цифрового наставника на примере прототипа мобильного приложения. Архитектура сочетает онтологическую модель жизненных компетенций, методы анализа естественного языка для интерпретации пользовательских диалогов и кластеризацию траекторий взросления на основе поведенческих данных. В работе описывается практическая реализация предложенного подхода, обосновывается выбор архитектурных решений, анализируются возникшие ограничения, а также рассматриваются альтернативные варианты построения цифрового наставника и направления его дальнейшего развития.

Ключевые слова: цифровой наставник, искусственный интеллект, онтология, жизненные компетенции, NLP, кластеризация, интерпретируемость, персонализация, образовательные технологии, траектории взросления.

The article examines a hybrid architecture of a digital mentor using a practical case study. The architecture combines an ontological model of life competencies, natural language processing methods for interpreting user dialogues, and clustering of adulthood trajectories based on behavioral data. The paper describes the practical implementation of the proposed approach, justifies the choice of architectural solutions, analyzes the encountered limitations, and discusses alternative approaches to building a digital mentor as well as directions for its further development.

Keywords: digital mentor, artificial intelligence, ontology, life competencies, NLP, clustering, interpretability, personalization, educational technology, maturation trajectories.

Введение. Процесс взросления в современных социальных и экономических условиях характеризуется высокой степенью неопределённости. Молодые люди сталкиваются с необходимостью самостоятельного принятия решений в области образования, профессионального развития, финансов, бытовой организации и эмоционального благополучия, при этом данные вопросы лишь частично отражены в формальных образовательных программах. В результате возрастает потребность в цифровых инструментах, способных обеспечить непрерывное и персонализированное сопровождение на этапе вхождения во взрослую жизнь.

Одним из возможных решений данной проблемы является создание цифрового наставника – программной системы, ориентированной не на разовое консультирование, а на длительное сопровождение пользователя. В рамках данной работы был разработан мобильный прототип такого наставника – приложения, архитектура которого основана на сочетании формализованных знаний и адаптивных методов анализа пользовательского взаимодействия.

Цель данной работы заключается в описании гибридной архитектуры цифрового наставника, анализе принятых проектных решений и оценке их применимости для задач поддержки как процесса взросления, так и решения нестандартных проблем.

Концептуальная модель цифрового наставника. Цифровой наставник в рамках исследования рассматривается как интеллектуальная система, способная интерпретировать пользовательские запросы, соотносить их с моделью жизненных компетенций и формировать рекомендации, релевантные текущему этапу развития пользователя. В отличие от традиционных обучающих приложений, логика работы наставника не предполагает линейного прохождения заранее заданных сценариев. Вместо этого акцент делается на адаптацию к индивидуальной траектории взросления, которая может изменяться со временем.

Данная концепция потребовала отказа от монолитной архитектуры в пользу гибридного подхода, в котором структурированное представление предметной области дополняется методами машинного обучения и анализа естественного языка. Такое сочетание позволяет одновременно обеспечивать интерпретируемость решений и гибкость системы при работе с неформализованными пользовательскими запросами.

Онтология жизненных компетенций как основа архитектуры. Ключевым элементом архитектуры цифрового наставника стала онтология жизненных компетенций, используемая для формализации области взросления. Выбор онтологического подхода был обусловлен необходимостью структурировать разнородные навыки и состояния, которые традиционно описываются в гуманитарных и психологических исследованиях, но редко имеют формальное представление в цифровых системах [1], [2].

В разработанной онтологии жизненные компетенции представлены в виде иерархически организованных понятий, отражающих такие аспекты, как личная ответственность, профессиональное самоопределение, финансовая самостоятельность, социальное взаимодействие и эмоциональная устойчивость. Между элементами онтологии задаются смысловые связи, позволяющие учитывать взаимное влияние различных компетенций друг на друга.

Практическое использование онтологии в приложении позволило реализовать семантическую навигацию по пользовательским запросам и контенту. Вместе с тем процесс проектирования онтологии сопровождался рядом сложностей, связанных с размытостью границ между компетенциями и субъективностью их интерпретации. Для их преодоления структура онтологии уточнялась итеративно на основе анализа реальных пользовательских сценариев.

NLP-анализ диалогов в цифровом наставнике. Одним из центральных механизмов взаимодействия пользователя с системой является диалоговый интерфейс, позволяющий формулировать запросы в свободной текстовой форме (рисунок 1). Анализ таких диалогов требует применения методов обработки естественного языка, способных извлекать смысловую информацию из неструктурированного текста.

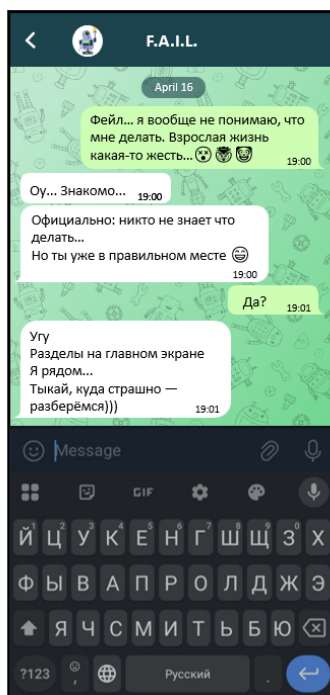


Рисунок 1 – Пример диалога с цифровым наставником, где система предлагает рекомендации и возможные шаги по её разрешению

В рамках реализованной архитектуры NLP-анализ используется для выявления намерений пользователя, ключевых тем запроса и эмоциональной окраски сообщения. Полученные данные сопоставляются с элементами онтологии жизненных компетенций, что позволяет определить, к

какому аспекту взросления относится конкретный запрос. Выбор гибридного подхода, сочетающего правила и обучаемые модели, был продиктован ограниченным объёмом обучающих данных и необходимостью сохранять интерпретируемость принимаемых решений [3].

Существенной сложностью стало то, что пользовательские сообщения часто содержат несколько взаимосвязанных проблем, а также элементы эмоционального высказывания, не имеющие прямого семантического соответствия. Это потребовало учитывать контекст диалога и избегать чрезмерной формализации ответов, что особенно важно для наставнического формата взаимодействия.

Генерация контента и персонализированная лента. Помимо диалогового режима, цифровой наставник включает ленту постов, формируемых с использованием генеративных моделей (рисунок 2). Данный механизм направлен на поддержку пользователя вне явного запроса и выполняет функцию ненавязчивого сопровождения и мотивации.



Рисунок 2 – Пример постов, сгенерированных нейросетью

Генерация контента осуществляется с учётом текущего состояния пользователя, выявленного на основе его диалогов и активности в приложении. Такой подход позволяет избежать универсального контента и адаптировать информационную подачу под индивидуальную траекторию взросления. Альтернативным решением могло бы стать использование статически подготовленных материалов, однако это существенно ограничило бы масштабируемость и персонализацию системы.

Кластеризация траекторий взросления. Для анализа долгосрочного пользовательского поведения в системе применяется кластеризация траекторий взросления. Под траекторией в данном контексте понимается последовательность взаимодействий пользователя с цифровым наставником, отражающая изменение его запросов, приоритетов и уровня вовлечённости [4].

Использование методов кластеризации позволяет выявлять типовые паттерны взросления и адаптировать рекомендации не только на индивидуальном, но и на групповом уровне. Вместе с тем данный подход имеет ограничения, связанные с динамичностью пользовательских состояний и риском избыточной типизации, что требует осторожной интерпретации результатов.

Альтернативные подходы и перспективы развития. В процессе проектирования цифрового наставника рассматривались альтернативные архитектурные решения, включая полностью

нейросетевые модели без явной онтологии и жёстко заданные сценарии сопровождения. Однако данные подходы либо снижали интерпретируемость системы, либо ограничивали её адаптивность.

Гибридная архитектура показала себя как компромиссное решение, сочетающее формализованное представление знаний и гибкость обработки пользовательских данных. В дальнейшем развитие системы возможно за счёт углублённого анализа эмоциональных состояний, расширения онтологии жизненных компетенций и применения цифрового наставника в образовательных и корпоративных средах [5], [6].

Заключение. В статье представлена гибридная архитектура цифрового наставника, реализованная в мобильном приложении F.A.I.L. Использование онтологии жизненных компетенций, NLP-анализа диалогов и кластеризации траекторий взросления позволило создать адаптивную систему сопровождения, ориентированную на долгосрочное развитие пользователя.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения гибридных архитектур в задачах цифрового наставничества и открывают возможности для дальнейших исследований в области интеллектуальных поддерживающих систем. Некоторые результаты исследований были доложены на различных научных конференциях [7]–[10].

Литература

1. Roy, M. Developing an ontology to explore competencies needed by instructional design professionals / M. Roy // EdTech Archives. The Journal of Applied Instructional Design. – URL: <https://edtecharchives.org/journal/1058/16915> (date of access: 16.04.2025).
2. Курзаева, Л. В. Методика разработки онтологической модели для формирования содержания и оценки ИКТ-компетентностей студентов вуза / Л. В. Курзаева, Г. Н. Чусавитина // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2019. – Т. 6, № 4. – С. 419–425.
3. Long, Y. Evaluating large language models in analysing classroom dialogue / Y. Long, H. Luo, Y. Zhang // NPJ Science of Learning. – 2024. – Vol. 9 (60). – URL: <https://www.nature.com/articles/s41539-024-00273-3> (date of access: 01.05.2025).
4. Clustering on longitudinal lifestyle trajectories and their associations with cognitive status / A. Roca-Ventura [et al.] // Frontiers in Psychology. – 2025. – Vol. 16 (1510971). – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2025.1510971/full> (date of access: 30.09.2025).
5. An ontology model for building, classifying and using learning outcomes / A. Kalou [et al.] // IEEE 12th International Conference on Advanced Learning Technologies, Rome, Italy, 4–6 July, 2012. – P. 61–65.
6. Hampton, A. J. Foundational Principles and Design of a Hybrid Tutor / A. J. Hampton, A. C. Graesser // Adaptive Instructional Systems : First International Conference, AIS 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCI 2019, Orlando, FL, USA, July 26–31. – Orlando, 2019. – P. 97–107.
7. Козликовская, В. В. Основные принципы UI/UX при разработке мобильного приложения «FOR ALL INTO LIFE» / В. В. Козликовская // Актуальные вопросы физики и техники : матер. XIV Респуб. научн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, посвященная 95-летию Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины, Гомель, 24 апреля 2025 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: А. Л. Самофалов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2025. – С. 63–64.
8. Козликовская, В. В. Анализ потребностей молодежи при переходе во взрослую жизнь : предпосылки для разработки мобильного приложения / В. В. Козликовская, Е. М. Березовская // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : матер. XXVIII Респуб. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 17–19 марта 2025 г. : в 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: С. П. Жогаль (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2025. – Ч. 2. – С. 65–66.
9. Козликовская, В. В. Реализация системы уведомлений в кроссплатформенном приложении FAIL: различия работы с push-уведомлениями на Android и IOS // Дни студенческой науки : матер. LIV студ. науч.-практ. конф., Гомель, 15–16 мая 2025г. : в 2 ч. / М-во образования РБ, ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: Р. В. Бородич (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 69–70.
10. Козликовская, В. В. Интеграция искусственного интеллекта в образовательные мобильные приложения: возможности и вызовы / В. В. Козликовская // Творчество молодых-2025 : сб. работ студентов, магистрантов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины», Гомель, 2025 г. : в 3 ч. / М-во образ. РБ, ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: Р. В. Бородич (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 186–189.

Разработка средств мониторинга в режиме реального времени технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол

В.А. ПРОХОРЕНКО, Ю.В. НИКИТЮК, В.С. СМОРОДИН, А.А. СЕРЕДА, С.И. СОКОЛОВ

В работе рассматривается задача разработки интеллектуальных средств мониторинга технологической операции лазерной полировки кварцевого стекла на основе анализа изображений зоны обработки. Предложен подход к обработке изображений зоны лазерной обработки с использованием сверточных нейронных сетей, который обеспечивает возможность реализации эффективного оптимизации режимов лазерной обработки в режиме реального времени. Полученные результаты позволяют использовать предложенные решения в составе интеллектуальных систем управления для реализации алгоритмов обратных связей в автоматизированных технологических процессах лазерной обработки хрупких неметаллических материалов.

Ключевые слова: лазерная обработка хрупких неметаллических материалов, лазерная полировка кварцевых стекол, нейронные сети, сверточные нейронные сети, автоматизированные технологические процессы, мониторинг процессов лазерной обработки в режиме реального времени.

This paper examines the development of intelligent monitoring tools for the laser polishing of quartz glass based on image analysis of the processing zone. An approach to processing images of the laser processing zone using convolutional neural networks is proposed, enabling the efficient determination of laser processing modes in real time. The results obtained enable the proposed solutions to be used in intelligent control systems for implementing feedback algorithms in automated laser processing of brittle non-metallic materials.

Keywords: laser processing of brittle non-metallic materials, laser polishing of quartz glass, neural networks, convolutional neural networks, automated processes, real-time monitoring of laser processing.

Введение. Развитие лазерных технологий обработки материалов сопровождается ростом интереса к системам мониторинга технологических процессов в режиме реального времени, позволяющим контролировать состояние зоны взаимодействия лазерного излучения с материалом и предотвращать образование дефектов. В современных исследованиях можно выделить ряд работ [1]–[4], где осуществлялся мониторинг динамики расплава в аддитивных технологических процессах лазерной обработки материалов с использованием различных наборов сенсоров.

Одним из наиболее распространённых подходов является оптический мониторинг зоны обработки с использованием видеокамер или высокоскоростных систем регистрации изображений. В работах [2], [5] предложены системы наблюдения расплава на основе высокоскоростных камер, позволяющие измерять геометрические характеристики расплавленной области и анализировать динамику её изменения в процессе обработки. В работе [5] реализована система визуального контроля расплава на основе CMOS-камеры и алгоритмов обработки изображений, позволяющая оценивать ширину и длину зоны плавления.

Другим активно развивающимся направлением является тепловизионный мониторинг, позволяющий измерять температурные поля в зоне обработки и анализировать их связь с параметрами процесса. В ряде работ предложены методы регистрации температурного распределения в зоне лазерного воздействия с использованием инфракрасных камер или двухволновой пирометрии [2], [6]. Такие методы позволяют определять максимальную температуру расплава, скорость охлаждения и температурные градиенты, что имеет важное значение для контроля качества технологического процесса [2]. Кроме того, предложены методы совмещения тепловизионных и оптических изображений зоны обработки для повышения точности диагностики состояния процесса [7].

В последние годы наблюдается активное внедрение методов машинного обучения и нейронных сетей для анализа данных мониторинга лазерных технологических процессов. В частности, нейронные сети используются для классификации режимов обработки по изображениям расплава или тепловизионным данным [8]–[10]. Так, в работе [9] предложена архи-

тектура глубокого обучения для анализа последовательностей тепловых изображений и прогнозирования геометрии расплава, а в исследовании [8] показано, что мультимодальное объединение данных различных сенсоров (например, оптических и акустических) позволяет существенно повысить точность обнаружения дефектов. Несмотря на достигнутые результаты, большинство существующих методов ориентировано на задачи лазерной сварки металлов или аддитивного производства, тогда как мониторинг процессов лазерной обработки неметаллических материалов исследован меньше.

В работах [11]–[14] была решена задача прогнозирования поведения трещины при лазерном термораскалывании силикатного стекла – важного материала, используемого в производстве компонентов микроэлектроники и оптики. Учитывая высокие требования к качеству кромки и необходимости раннего выявления отклонений, предложено использование методов компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматизации контроля. При этом в работах [12]–[14] предложен метод контроля развития разделяющей трещины в процессе управляемого лазерного термораскалывания силикатных стекол, в основе которого лежит поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости).

Кварцевое стекло, благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств (высокой термостойкости, химической инертности, механической прочности и широкой оптической прозрачности), является незаменимым материалом в различных областях науки и техники, включая лазерную оптику, микроэлектронику и аэрокосмическую промышленность. Важной задачей в данном направлении является достижение высокого качества обработки поверхностей изделий из кварцевого стекла, что традиционно осуществляется методами механической полировки [15]. Однако механическое воздействие неизбежно приводит к формированию дефектного подповерхностного слоя, включающего микротрещины, царапины и остаточные напряжения, которые критически снижают эксплуатационные характеристики изделий, выступая инициаторами поглощения лазерного излучения и приводя к снижению порога лазерного повреждения. В качестве эффективной бесконтактной альтернативы выступает технология лазерной полировки, основанная на локальном оплавлении тонкого поверхностного слоя излучением CO_2 -лазера. Под действием сил поверхностного натяжения в образовавшейся микрованне расплава происходит сглаживание исходной микротопографии, что позволяет достигать необходимого уровня шероховатости и эффективно устранять дефекты, оставшиеся после предварительной обработки [16]–[21].

В ряде последних исследований также рассматриваются методы высокоскоростного оптического измерения микрорельефа поверхности и динамики расплава при лазерной полировке. Например, в работе [22] предложена система интерферометрического измерения морфологии поверхности с наносекундным временным разрешением, позволяющая наблюдать динамику изменения шероховатости поверхности в процессе лазерной обработки. Однако такие методы требуют сложного измерительного оборудования.

Таким образом, анализ современных исследований показывает, что существующие системы мониторинга, как правило, используют один тип измерительной информации (температуру, геометрию расплава или акустические сигналы) и успешно учитывают внутренние напряжения в материале при реализации обработки силикатных стекол методом лазерного раскалывания.

Кроме того, в большинстве работ отсутствует классификация режимов лазерной полировки на основе комплексного анализа изображений зоны обработки в режиме реального времени. Это определяет актуальность разработки методов и средств мониторинга, сочетающих визуализацию полей напряжений, измерение температуры и нейросетевой анализ изображений.

Методика проведения экспериментов. В ходе проведения экспериментов осуществлялись реализации технологической операции полировки кварцевых стекол с использованием CO_2 -лазера.

Для классификации режимов лазерной полировки был использован поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости). В его основе лежит физико-механическое явление, при котором плоско поляризованные волны при прохождении через деформированный элемент прозрачной модели получают сдвиг фаз или оптическую разность хода, величина кото-

рой зависит от напряженно деформированного состояния элемента. По интерференционной картине, получаемой при наложении этих волн, можно получить информацию о величине и пространственном расположении напряжений или деформаций, возникающих в обрабатываемом материале. На интерференционной картине область сильных сжимающих и растягивающих напряжений выражена зоной с повышенной интенсивностью проходящего света.

Для экспериментальных исследований был разработан макет установки, схема которого представлена на рисунке 1, при этом ориентация поляризатора и анализатора выбрана таким образом, что при отсутствии в обрабатываемой области деформаций и напряженного состояния в наблюдаемой интерференционной картине формировалась контрастная зона с пониженной интенсивностью света.

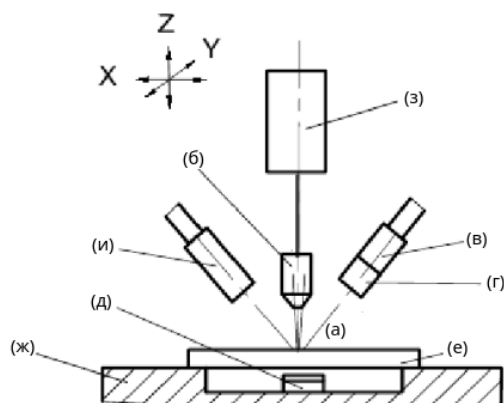


Рисунок 1 – Схема размещения оборудования при проведении натурных экспериментов по лазерной полировке кварцевых стекол ((а) – зона лазерной обработки, (б) – фокусирующий объектив лазерного луча, (в) – камера оптического диапазона, сфокусированная на зоне обработки, (г) – пленка анализатора, установленная перед объективом камеры под требуемым углом, (д) – источник поляризованного света, (е) – обрабатываемая заготовка из кварцевого стекла, (ж) – технологический стол, поддерживающий заготовку и обеспечивающий возможность ее движения под лазерным лучом, (з) – CO₂-лазер ИЛПН-708, (и) – тепловизор, направленный на зону лазерной обработки)

Поляризатор установлен так, чтобы поляризованный свет проходил сквозь обрабатываемое стекло и попадал на камеру оптического диапазона, которая обеспечивает возможность фиксации 60 кадров в секунду, с установленным перед ней анализатором. Дополнительно, для анализа распределения температурных полей и определения максимальных величин температур на поверхности материала в зоне лазерной обработки использовался тепловизор ИТ-3СМ.

Было осуществлено 50 экспериментов, из них в 21 эксперименте фиксировались показания температуры тепловизором. Видеозапись осуществлялась с частотой 60 кадров в секунду при длительности одного эксперимента 30–120 секунд. Съемка выполнялась при различных режимах работы лазерной установки, характеризующихся изменением размера лазерного пучка, плотности мощности лазерного излучения и скорости перемещения заготовки относительно лазерного луча. При этом скорость лазерной обработки варьировалась от 0,1 до 7 мм/с, радиус лазерного пучка – от 2 до 2,5 мм. Для обеспечения статистически достаточной обучающей выборки в ходе экспериментов было получено 49 видеозаписей.

По результатам экспертного анализа полученных в ходе натурных экспериментов видеозаписей и полированных кварцевых стекол выделено 3 визуально характерных класса изображений, которые необходимо надежно определять для принятия решений по коррекции управления технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол в режиме реального времени:

1. Недостаточная полировка (наличие остаточной шероховатости и отсутствие выраженного эффекта сглаживания поверхности). На изображении зона после воздействия лазерным излучением характеризуется повышенной интенсивностью в поляризованном свете (светлая или белая область) или содержит контрастные светлые пятна, вследствие наличия

напряженного состояния в результате деформаций поверхности либо рассеивания света на неполированной поверхности, что приводит к недостаточной прозрачности отполированной полосы на кварцевом стекле.

2. Нормальная реализация полировки (формирование однородной сглаженной поверхности без признаков перегрева или дефектов). На изображении зона после воздействия лазерным излучением характеризуется пониженной интенсивностью в поляризованном свете (темная или черная область), обусловленная отсутствием сдвига фаз или оптической разности хода поляризованного света при прохождении полированной области, а также отсутствия рассеивания света на гладкой полированной поверхности.

3. Переполировка (появление признаков локального перегрева, избыточного плавления и деформации поверхностного слоя) зоны обработки. На изображении зона после воздействия лазерным излучением характеризуется наличием контрастных светлых полос от продуктов кипения и испарения материала в результате локального перегрева поверхности кварцевого стекла. В этом случае на обрабатываемом изделии образуются полосы оплавления и изделие отбраковывается.

Определены требования технического регламента осуществления мониторинга в режиме реального времени. Использование тепловизора для определения максимума температуры в зоне лазерной обработки при реализации технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол позволяет однозначно установить позицию области на получаемых изображениях, где осуществляется нагрев материала и должен осуществляться процесс полировки. Данную информацию система мониторинга использует для определения позиции зоны контроля технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол в режиме реального времени.

Подготовка исходных данных из видеопотока, захваченного с камеры при наличии источника поляризованного света. Выполнялась предварительная обработка данных, включающая выделение области интереса, нормализацию яркости, уменьшение пространственного разрешения кадров до разрешения 384×384 и формирование размеченной выборки изображений. Разметка выполнялась экспертным способом с отнесением каждого кадра к одному из трех классов режимов работы технологической операции: недостаточная полировка, штатный режим полировки и режим переполировки (расплавления). Для формирования набора данных отобраны наборы кадров, являющиеся характерными для каждого класса и репрезентативными. С целью повышения робастности процесса распознавания классификатором в набор данных внесены изменения исходных изображений: небольшие сдвиги (на 5–10 % от размера изображения), небольшие повороты (до 15°), небольшие изменения масштаба (2–10 %). Все типы изменений вносились с вероятностью $P = 0,4$. При этом сформирован набор данных из 10332 изображений (3709 изображений нормальной полировки, 4231 изображений недополировки, 2392 изображений переполировки).

Примеры исходных изображений зоны лазерной обработки при реализации технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол показаны на рисунке 2.

Обучение нейронных сетей распознаванию режимов реализации технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол. Для автоматического определения режимов реализации технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол по изображениям зоны обработки было выполнено обучение нескольких архитектур сверточных нейронных сетей с использованием подхода transfer learning, либо полного обучения всех весов сети. Используются свободно доступные модели ResNet50 [23], MobileNetV3 [24] (варианты small и large), реализованные в библиотеке Keras [25] языка python. При применении transfer learning использовались нейросети, обученные на наборе данных ImageNet [26]. При этом использован стандартный размер входа сети $224 \times 224 \times 3$ для цветных изображений, но при этом разрешение исходных изображений варьировалось от 32×32 до 128×128 с 3 каналами (с цветом) либо с одним каналом (черно-белое изображение) и затем приводилось к форме $224 \times 224 \times 3$ в случае transfer learning.

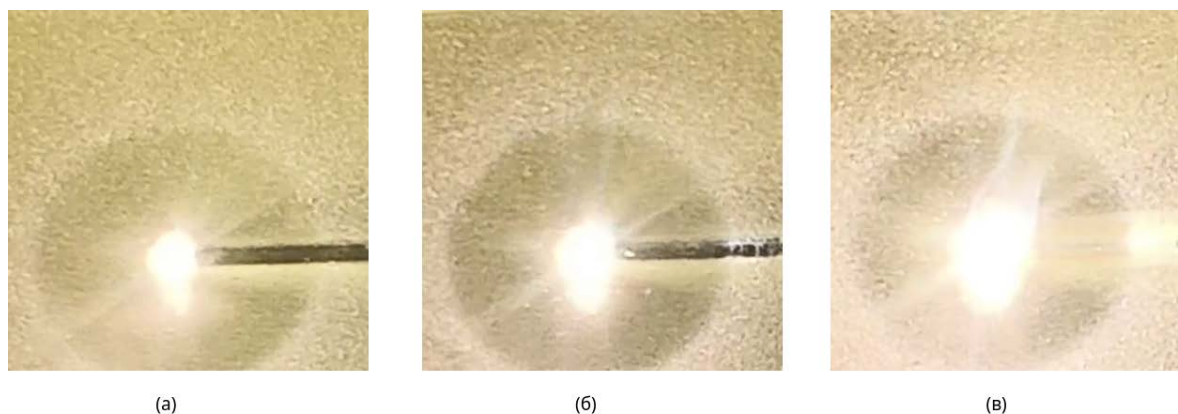


Рисунок 2 – Примеры размеченных изображений зоны лазерной обработки кварцевых стекол при реализации технологической операции лазерной полировки ((а) – нормальная полировка, (б) – недостаточная полировка, (в) – переполировка)

Таблица 1 – Результаты обучения нейросетей задаче классификации изображений зоны обработки технологической операции лазерной полировки (метрики оценки качества модели классификатора, А – accuracy, Р – precision, R – recall, F1 – F-мера)

Используемая нейросетевая модель	Полное обучение	Число эпох обучения	Число параметров сети, настраиваемых / ненастраиваемых	Размер изображения	Цветное изображение (3 канала)	Метрики оценки качества модели
resnet50	нет	10	6,147/23,587,712	128 × 128	да	A: 0.986; P: 0.9867; R: 0.9872 ; F1: 0.987
resnet50	нет	10	6,147/23,587,712	128 × 128	нет	A: 0.9844; P: 0.9855; R: 0.9859; F1: 0.9857
mobilenet_v3_small	нет	10	1,731/939,120	128 × 128	да	A: 0.9730; P: 0.9744; R: 0.9751; F1: 0.9747
mobilenet_v3_small	нет	10	1,731/939,120	128 × 128	нет	A: 0.9677; P: 0.9685; R: 0.9705; F1: 0.9695
resnet50	нет	10	6,147/23,587,712	64 × 64	да	A: 0.983; P: 0.9839; R: 0.9841; F1: 0.984
resnet50	нет	10	6,147/23,587,712	64 × 64	нет	A: 0.9808; P: 0.9818; R: 0.9824; F1: 0.9821
mobilenet_v3_small	нет	10	1,731/939,120	64 × 64	да	A: 0.9638; P: 0.9653; R: 0.967; F1: 0.9663
mobilenet_v3_small	нет	10	1,731/939,120	64 × 64	нет	A: 0.9575; P: 0.9605; R: 0.9608; F1: 0.9575
resnet50	нет	10	6,147/23,587,712	32 × 32	да	A: 0.9819; P: 0.9831; R: 0.9834; F1: 0.9819
resnet50	нет	10	6,147/23,587,712	32 × 32	нет	A: 0.9781; P: 0.9793; R: 0.9803; F1: 0.9798
mobilenet_v3_small	нет	10	1,731/939,120	32 × 32	да	A: 0.9036; P: 0.9041; R: 0.9112; F1: 0.9073
mobilenet_v3_small	нет	10	1,731/939,120	32 × 32	нет	A: 0.8899; P: 0.8992; R: 0.8979; F1: 0.8931
resnet50	да	15	23,540,739/53,120	32 × 32	да	A: 0.9986; P: 0.9987; R: 0.9987; F1: 0.9987
resnet50	да	15	23,540,739/53,120	32 × 32	нет	A: 0.9984; P: 0.9985; R: 0.9985; F1: 0.9984
mobilenet_v3_large	да	15	2,974,835/24,400	32 × 32	да	A: 0.9969; P: 0.9969; R: 0.997; F1: 0.9969
mobilenet_v3_large	да	15	2,974,835/24,400	32 × 32	нет	A: 0.9887; P: 0.9885; R: 0.9895; F1: 0.989
mobilenet_v3_small	да	15	928,739/12,112	32 × 32	да	A: 0.9951; P: 0.9957; R: 0.9955; F1: 0.9956
mobilenet_v3_small	да	15	928,739/12,112	32 × 32	нет	A: 0.9804; P: 0.9820; R: 0.9825; F1: 0.9821

Было проведено 18 численных экспериментов, их результаты приведены в таблице 1. В каждом эксперименте использована пятикратная кросс-валидация на исходном наборе данных. Обучение производилось на графическом ускорителе NVIDIA GTX1070. При этом нейронные сети были обучены с использованием оптимизатора Adam со стандартным коэффициентом скорости обучения $\alpha = 1e - 3$. Среднее время прямого прохода нейросетей при этом было определено как 55–72 мс. Примеры матриц неточностей, рассчитанных по результатам кросс-валидации моделей семейства MobileNetV3, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Матрицы неточностей при кросс-валидации моделей MobileNetV3 при полном обучении сети на протяжении 15 эпох нецветными и цветными изображениями зоны лазерной обработки при реализации технологической операции лазерной полировки кварцевых стекол разрешения 32×32

MobileNetV3 (small)						MobileNetV3 (large)					
цветные изображения			нецветные изображения			цветные изображения			нецветные изображения		
3680	29	0	3670	37	2	3697	12	0	3656	41	12
17	4212	2	137	3084	10	6	4217	8	33	4179	19
1	2	2389	5	12	2375	1	5	2386	1	11	2380

Установлено, что снижение разрешения исходных изображений до 32×32 и удаление информации о цвете не приводит к снижению точности распознавания ниже 98 % при полном обучении весов нейросетей. Показано, что при использовании компактных моделей, таких как MobileNetV3 (small, 928739 настраиваемых параметров) при обучении всех весов сети возможно получить качество основных метрик классификации (accuracy, precision, recall, F1) не ниже 98 %.

Обучены нейронные сети, которые на устройстве с графическим ускорителем обеспечивают обработку изображения, захваченного камерой за время менее 100 мс, что позволяет обеспечить определение класса изображения зоны лазерной обработки при реализации технологической операции лазерной полировки с точностью не менее 98 % раз в 0,1 с.

Заключение. Разработаны средства мониторинга, включающие нейросетевые модели для классификации кадров мономодального видеосигнала и техническое средство снятия максимума температуры зоны лазерной обработки, позволяющие определять режим реализации технологической операции лазерной полировки кварцевого стекла с точностью не менее 98 % и средним временем обработки одного изображения не более 55 мс на компьютере с графическим ускорителем, что обеспечивает возможность их применения в качестве компонентов интеллектуальных компьютерных систем для реализации алгоритмов построения обратных связей по управлению технологическими операциями автоматизированных технологических систем лазерной обработки хрупких неметаллических материалов в режиме реального времени.

Литература

1. Chen, L. In-situ melt pool monitoring of laser aided additive manufacturing using infrared thermal imaging / L. Chen, X. Yao, N. P. H. Ng [et al.] // 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). – Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. – P. 1478–1482.
2. Wang, H. Online in-situ monitoring of melt pool characteristic based on a single high-speed camera in laser powder bed fusion process / H. Wang [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 211. – Art. 118515.
3. Lin, X. Motion feature based melt pool monitoring for selective laser melting process / X. Lin, Q. Wang, J. Y. H. Fuh [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – Vol. 303. – Art. 117523.
4. Патент BY 13875. Устройство мониторинга наплавляемых слоев изделий и управления процессом лазерной наплавки изделий № u 20250183 : заявлено 08.08.2025 : опубл. 20.12.2025 / Никитюк Ю. В., Баевич Г. А., Максименко А. В., Прохоренко В. А., Усов П. П. ; заявитель: Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины». – 8 с.
5. Le, T.-N. Vision-based in-situ monitoring system for melt-pool detection in laser powder bed fusion process / T.-N. Le, M. H. Lee, Z.-H. Lin [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 68. – P. 1735–1745.

6. Morales, R. E. Real-time laser ultrasonic monitoring of laser-induced thermal processes / R. E. Morales, K. J. Harke, J. W. Tringe [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – Art. 9865.
7. Xu, H. In situ monitoring in laser melt injection based on fusion of infrared thermal and high-speed camera images / H. Xu, H. Huang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 92. – P. 466–478.
8. Chen, L. Multimodal sensor fusion for real-time location-dependent defect detection in laser-directed energy deposition / L. Chen, X. Yao, W. Feng [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.13596> (date of access: 05.03.2026).
9. Ogoke, F. Deep learning for melt pool depth contour prediction from surface thermal images via vision transformers / F. Ogoke, P. Myung-Won Pak, A. Myers [et al.] // *Additive Manufacturing Letters*. – 2024. – Vol. 8. – Art. 100243.
10. Xu, K. Integrating machine learning with multimodal monitoring system utilizing acoustic and vision sensing to evaluate geometric variations in laser directed energy deposition / K. Xu, C. K. P. Vallabh, S. Manoochehri. – URL: <https://arxiv.org/abs/2508.02847> (date of access : 05.03.2026).
11. Zhao, C. A multimodal information fusion method for real-time monitoring of glass cutting with laser-induced thermal-crack propagation / C. Zhao [et al.] // *Optics & Laser Technology*. – 2025. – Vol. 180. – Art. 111457.
12. Prokhorenko, V. Optimization of the parameters technological operation of laser cutting of silicate glass using a genetic algorithm and neural networks / V. Prokhorenko, Y. Nikityuk, V. Smorodin [et al.] // *2025 9th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. – Gomel, Belarus, 2025. – P. 1–3.
13. Sereda, A. A. Increasing the efficiency of laser-controlled thermal splitting of silicate glasses using the photoelasticity method / A. A. Sereda, Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdiukov [et al.]// *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*. – 2024. – № 2 (97). – P. 34–40.
14. Патент BY 13800. Устройство для мониторинга процесса лазерной резки стекла и управления процессом лазерной резки стекла : № u20250110 : заявлено 15.05.2025 : опубл. : 05.09.2025 / Никитюк Ю. В., Прохоренко В. А., Середа А. А., Усов П. П. ; заявитель: Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины». – 6 с.
15. Arbuzov, V. I. Osnovy radiatsionnogo opticheskogo materialovedeniya / V. I. Arbuzov. – Saint Petersburg : SPbGU ITMO, 2008. – 284 p.
16. Sysoev, V. K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V. K. Sysoev // *Glass and Ceramics*. – 2003. – Vol. 60, № 7–8. – P. 223–226.
17. Hildebrand, J. Laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner [et al.]// *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – P. 452–461.
18. Hildebrand, J. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner [et al.] // *Physics Procedia*. – 2012. – Vol. 39. – P. 277–285.
19. Shershnev, E. B. Investigation of the laser polishing process of quartz glass / E. B. Shershnev, Yu. V. Nikityuk, A. E. Shershnev [et al.]// *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*. – 2015. – № 4 (25). – P. 45–49.
20. Innovatsionnye tekhnologii i oborudovanie submikronnoy elektroniki / A. P. Dostanko [et al.] ; ed. by A. P. Dostanko. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2020. – 260 p.
21. Emelyanov, V. A. Optimization of laser polishing of quartz glass using the method of computational experiment design / V. A. Emelyanov, E. B. Shershnev, Yu. V. Nikityuk [et al.]// *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*. – 2022. – № 2 (51). – P. 26–30.
22. Wang, D. Dynamics of molten pool evolution and high-speed real-time optical measurement in laser polishing / D. Wang, M. Yu, Y. Yao [et al.] // *Light : Advanced Manufacturing*. – 2024. – Vol. 5. – Art. 50.
23. He, K. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren [et al.]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2016. – P. 770–778.
24. Howard, A. Searching for MobileNetV3 / A. Howard, M. Sandler, G. Chu [et al.]// *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. – 2019. – P. 1314–1324.
25. Chollet, F. Keras / F. Chollet [et al.]. – URL: <https://keras.io/> (Date of access: 05.03.2026).
26. Deng, J. ImageNet : A large-scale hierarchical image database / J. Deng, W. Dong, R. Socher [et al.] // *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2009. – P. 248–255.

О пересечении θ -подгрупп, не содержащих \mathfrak{F} -корадикал

Р.В. Бородич, Е.Н. Бородич, А.В. Бузланов

В работе исследовано строение подгруппы, равной пересечению ядер максимальных A -допустимых подгрупп близких к F -абнормальным с индексами, не делящимися на простые числа из π . Установлены свойства соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини.

Ключевые слова: конечная группа, формация, \mathfrak{F} -корадикал, функтор.

In this paper, we study the structure of a subgroup equal to the intersection of the kernels of maximal A -admissible subgroups close to F -abnormal ones with indices not divisible by primes from π . The properties of the corresponding generalized Frattini subgroup are established.

Keywords: finite group, formation, \mathfrak{F} -residual, functor.

Введение. В данной статье все рассматриваемые группы предполагаются конечными. Одним из классических и активно развивающихся направлений в теории конечных групп является изучение свойств пересечений максимальных подгрупп, а также выяснение того, каким образом такие пересечения влияют на подгрупповую структуру и нормальное строение группы. Ключевую роль в указанных исследованиях традиционно играет подгруппа Фраттини – пересечение всех максимальных подгрупп группы, впервые введённая в работе [1] и ставшая фундаментальным объектом теории.

В дальнейшем теорема Фраттини и связанные с ней идеи получили естественное развитие в работах различных авторов. Так, В. Гашоц [2] рассмотрел пересечение всех тех максимальных подгрупп, которые не являются нормальными (так называемых ненормальных максимальных подгрупп), а В. Дескинс [3] изучил пересечение максимальных подгрупп, индексы которых не делятся на заданное простое число. Другие важные результаты в этом направлении, касающиеся взаимосвязи между пересечениями максимальных подгрупп и арифметическими свойствами их индексов, представлены в работах [4]–[6].

Особенно интенсивное развитие теория пересечений максимальных подгрупп получила в 1960-х гг., что во многом было связано с крупными достижениями в теории формаций конечных групп. Использование формационной терминологии и методов позволило не только систематизировать накопленные ранее разрозненные данные о максимальных подгруппах, но и получить новые содержательные результаты. Важную роль в этом процессе сыграло введённое Р. Картером, Т. Хоуксом [7] и Л.А. Шеметковым [8] понятие π -абнормальной максимальной подгруппы, которое дало ключ к описанию строения групп через пересечения подгрупп с ограничениями на индексы.

Настоящая работа продолжает указанные направления исследований, но уже в контексте групп с операторами. Тем самым она развивает и обобщает результаты, полученные ранее в работах [9], [10], [11], где были заложены основы подхода, применяемого в данной статье.

2. Определения и обозначения. Основные определения можно посмотреть в работе [12]. Остановимся только на введении подгрупп, необходимых для изложения материала в данной работе.

Пусть \mathfrak{F} – формация. Обозначим через

$\Phi_{\theta, \pi}(G, A) = \bigcap \{M_G \mid M \in \theta(G), M - A\text{-допустимая подгруппа, } |G:M| \text{ не делится на числа из } \pi\}$;

$\Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \cap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \not\cong G^{\mathfrak{F}}, M - A\text{-допустимая подгруппа, } |G : M| \text{ не делится на числа из } \pi \}$;

$\overline{\Phi}_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \cap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \not\cong G^{\mathfrak{F}}, M \notin \mathfrak{F}, M - A\text{-допустимая подгруппа, } |G : M| \text{ не делится на числа из } \pi \}$;

В случае отсутствия подгрупп с указанными свойствами считаем, что эти пересечения равны G .

Отметим, что максимальная A -допустимая подгруппа M группы G должна либо целиком содержать \mathfrak{F} -корадикал группы G , либо $MG^{\mathfrak{F}} = G$. Это связано с тем, что произведение A -допустимых подгрупп будет A -допустимо и \mathfrak{F} -корадикал $G^{\mathfrak{F}}$ – характеристическая подгруппа (допустима относительно любой группы операторов), то $MG^{\mathfrak{F}} = M$ или $MG^{\mathfrak{F}} = G$.

Необходимо также заметить, что, во-первых, не всякая максимальная подгруппа группы G будет являться максимальной A -допустимой подгруппой относительно некоторой группы операторов A . Во-вторых, не всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы G обязана быть максимальной подгруппой в самой группе G (см. [9]).

3. Вспомогательные результаты.

Лемма 3.1. Пусть группа G имеет группу операторов A , θ – абнормально полный подгрупповой функтор, \mathfrak{F} – формация. Тогда если N – нормальная A -допустимая θ -подгруппа группы G и $N \subseteq \Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то

$$\Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G/N, A) = \Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / N.$$

Доказательство. Если $N \subseteq \Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то $N \subseteq M$, где M – любая максимальная A -допустимая θ -подгруппа из G , не содержащая $G^{\mathfrak{F}}N/N$, с индексом, не делящимся на простые числа из π . Тогда

$$\Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G/N, A) = \cap (M/N)_{G/N}$$

где M/N пробегает множество всех максимальных A -допустимых θ -подгрупп, не содержащих $G^{\mathfrak{F}}N/N$ из G/N , с индексом, не делящимся на простые числа из π . Поэтому

$$\cap (M/N)_{G/N} = (\cap M_G) / N = \Phi_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / N$$

и утверждение леммы верно.

Лемма 3.2. Пусть группа G имеет группу операторов A , \mathfrak{F} – формация. Тогда если N – нормальная A -допустимая подгруппа группы G и $N \subseteq \overline{\Phi}_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то

$$\overline{\Phi}_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G/N, A) = \overline{\Phi}_{\theta, \pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / N.$$

Доказательство осуществляется непосредственной проверкой, как и в лемме 1.

Теорема 3.3 [11, с. 29]. Пусть группа G имеет группу операторов A , \mathfrak{F} – ступенчатая формация. Тогда

$$\Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) = Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_{\theta}(G, A)).$$

Теорема 3.4 [12, с. 72]. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и подгруппа $\Phi_{\theta, \pi}(G, A)$ обладает свойством C_{π} . Тогда

$$\Phi_{\theta, \pi}(G, A) / O_{\pi}(G) = \Phi_{\theta}(G / O_{\pi}(G), A).$$

4. Основной результат.

Теорема 4.1. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если в группе G подгруппа $\Phi_{\theta, \pi}(G, A)$ обладает свойством C_{π} , то

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A).$$

Доказательство. Пусть $O_{\pi}(G) \neq 1$. По теореме 3.4

$$\Phi_{\theta\pi}(G, A) / O_{\pi}(G) = \Phi_{\theta}(G / O_{\pi}(G), A).$$

Тогда теорема для факторгруппы $G / O_{\pi}(G)$ верна по индукции. Следовательно,

$$\Phi_{\theta\pi}(G / O_{\pi}(G), A) / O_{\pi}(G / O_{\pi}(G)) = \Phi_{\theta}(G / O_{\pi}(G) / O_{\pi}(G / O_{\pi}(G)), A).$$

Так как $O_{\pi}(G / O_{\pi}(G)) = 1$ и на основании леммы 3.1

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A) = \Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G),$$

то

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A).$$

Пусть теперь $O_{\pi}(G) = 1$. Тогда по теореме 3.4 $\Phi_{\theta\pi}(G, A) / O_{\pi}(G) = \Phi_{\theta}(G / O_{\pi}(G), A)$. Значит,

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\theta\pi}(G, A) = \Phi_{\theta}(G, A).$$

Пусть K / N – главный фактор группы G , причём,

$$\Phi_{\theta}(G, A) \subseteq N \subseteq K \subseteq \Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A).$$

Так как

$$K \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\theta}(G, A),$$

то

$$N = N(K \cap G^{\mathfrak{F}}) = K \cap NG^{\mathfrak{F}}.$$

Поэтому имеет место следующий изоморфизм:

$$KG^{\mathfrak{F}} / NG^{\mathfrak{F}} \simeq K / K \cap NG^{\mathfrak{F}} = K / N(K \cap G^{\mathfrak{F}}) = K / N.$$

Но $G / NG^{\mathfrak{F}} \in \mathfrak{F}$, поэтому главный фактор $KG^{\mathfrak{F}} / NG^{\mathfrak{F}}$ является \mathfrak{F} -центральным в G . Следовательно, главный фактор K / N также является \mathfrak{F} -центральным в G . Таким образом, $\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A)$ – \mathfrak{F} -гиперцентральная нормальная подгруппа группы $G / \Phi_{\theta}(G, A)$. Поэтому

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) \subseteq Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_{\theta}(G, A)).$$

С другой стороны, на основании теоремы 3.3

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) \supseteq \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) = Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_{\theta}(G, A)).$$

Значит,

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) = Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_{\theta}(G, A)).$$

Следовательно,

$$\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A),$$

то есть $\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G, A)$. Теорема доказана.

Из теоремы 4.1 с помощью теоремы 3.3 получаем следующее

Следствие 4.1.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, \mathfrak{F} – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, и подгруппа $\Phi_{\theta\pi}(G, A)$ обладает свойством C_{π} , тогда $\Phi_{\theta\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) \in \mathfrak{F}$.

Так как в любой группе G подгруппа $\Phi_{\theta\pi}(G, A)$ обладает свойством C_p , то при $\pi = \{p\}$ получаем следующий результат.

Следствие 4.1.2. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, тогда

$$\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G), A).$$

Следствие 4.1.3. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, \mathfrak{F} – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, тогда $\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

Если группа операторов тривиальна, то из теоремы 4.1 получаем

Следствие 4.1.4. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор. Если в группе G подгруппа $\Phi_{\theta_\pi}(G)$ обладает свойством C_π , то

$$\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}(G) / O_\pi(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_\pi(G)).$$

Следствие 4.1.5. Пусть \mathfrak{F} – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и подгруппа $\Phi_{\theta_\pi}(G)$ обладает свойством C_π , то $\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}(G) / O_\pi(G) \in \mathfrak{F}$.

Следствие 4.1.6. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, тогда

$$\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) / O_p(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G)).$$

Следствие 4.1.7. Пусть θ – абнормально полный подгрупповой функтор, \mathfrak{F} – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, тогда $\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

В случае, когда θ является тривиальным, то из теоремы 4.1 получается ещё ряд соответствующих утверждений.

Теорема 4.2. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, и $\overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G, A) \neq G$. Если в группе G подгруппа $\Phi_{\theta_\pi}(G, A)$ обладает свойством C_π , то

$$\overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G, A) / O_\pi(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_\pi(G), A).$$

Доказательство. Вначале покажем, что

$$K = \overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\theta_\pi}(G, A).$$

Пусть $K \not\subseteq \Phi_{\theta_\pi}(G, A)$. Тогда в G найдётся такая абнормальная максимальная A -допустимая подгруппа M , индекс которой не делится на простое число из π , что $G = KM$. Понятно, что M не содержит $G^{\mathfrak{F}}$. Если $M \notin \mathfrak{F}$, то $K \subseteq \overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G, A) \subseteq M$, что невозможно. Следовательно, $M \in \mathfrak{F}$. Отсюда

$$G / K = MK / K \simeq M / M \cap K \in \mathfrak{F},$$

а это значит, что $G^{\mathfrak{F}} \subseteq K \subseteq \overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G, A)$. Это противоречит существованию в группе G абнормальной максимальной A -допустимой подгруппы, не содержащей $G^{\mathfrak{F}}$, индекс которой не делится на простые числа из π . Итак, $K \subseteq \Phi_{\theta_\pi}(G, A)$.

Пусть $O_\pi(G) \neq 1$. Тогда по теореме 3.4

$$\Phi_{\theta_\pi}(G, A) / O_\pi(G) = \Phi_{\theta}(G / O_\pi(G), A),$$

получаем справедливость теоремы для группы $G / O_\pi(G)$ по индукции. Следовательно,

$$\overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G / O_\pi(G), A) / O_\pi(G / O_\pi(G)) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_\pi(G) / O_\pi(G / O_\pi(G)), A).$$

Так как $O_\pi(G / O_\pi(G)) = 1$ и

$$\overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G / O_\pi(G), A) = \overline{\Phi_{\theta_\pi}^{\mathfrak{F}}}(G, A) / O_\pi(G),$$

то

$$\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) = \Phi_0^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A).$$

Пусть теперь $O_{\pi}(G) = 1$. Тогда

$$\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{0\pi}(G, A) = \Phi_0(G, A).$$

Пусть K / N – главный фактор группы G , причём,

$$\Phi_0(G, A) \subseteq N \subseteq K \subseteq \overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A).$$

Так как

$$K \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_0(G, A),$$

то

$$N = N(K \cap G^{\mathfrak{F}}) = K \cap NG^{\mathfrak{F}}.$$

Поэтому имеет место следующий изоморфизм:

$$KG^{\mathfrak{F}} / NG^{\mathfrak{F}} \simeq K / K \cap NG^{\mathfrak{F}} = K / N(K \cap G^{\mathfrak{F}}) = K / N.$$

Так как $G / NG^{\mathfrak{F}} \in \mathfrak{F}$, поэтому главный фактор $KG^{\mathfrak{F}} / NG^{\mathfrak{F}}$ является \mathfrak{F} -центральным в G . Следовательно, главный фактор K / N также является \mathfrak{F} -центральным в G . Таким образом, $\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A)$ – \mathfrak{F} -гиперцентральная нормальная подгруппа группы $G / \Phi_0(G, A)$. Поэтому

$$\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A) \subseteq Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_0(G, A)).$$

С другой стороны, на основании теоремы 3.3

$$\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A) \supseteq \Phi_0^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A) = Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_0(G, A)).$$

Значит,

$$\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A) = Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_0(G, A)).$$

Следовательно,

$$\Phi_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A) = \Phi_0^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_0(G, A),$$

то есть $\Phi_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \Phi_0^{\mathfrak{F}}(G, A)$. Теорема доказана.

Следствие 4.2.1. *Группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, \mathfrak{F} – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, и $\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Если подгруппа $\Phi_{0\pi}(G, A)$ обладает свойством C_{π} , то*

$$\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) \in \mathfrak{F}.$$

Так как в любой группе G подгруппа $\Phi_{0\pi}(G, A)$ обладает свойством C_p , то при $\pi = \{p\}$ получаем следующий результат.

Следствие 4.2.2. *Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\overline{\Phi}_{0p}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Тогда*

$$\overline{\Phi}_{0p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) = \Phi_0^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G), A).$$

Следствие 4.2.3. *Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $\overline{\Phi}_{0\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Если \mathfrak{F} – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, то $\overline{\Phi}_{0p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.*

Если группа операторов тривиальна, то из теоремы 4.2 получаем

Следствие 4.2.4. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $\overline{\Phi}_{\theta_{\pi}}^{\mathfrak{F}}(G) \neq G$. Если в группе G подгруппа $\Phi_{\theta_{\pi}}(G)$ обладает свойством C_{π} , то

$$\overline{\Phi}_{\theta_{\pi}}^{\mathfrak{F}}(G) / O_{\pi}(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G)).$$

Следствие 4.2.5. Пусть θ – абнормально полный подгрупповой функтор, \mathfrak{F} – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, и $\overline{\Phi}_{\theta_{\pi}}^{\mathfrak{F}}(G) \neq G$. Если подгруппа $\Phi_{\theta_{\pi}}(G)$ обладает свойством C_{π} , то

$$\overline{\Phi}_{\theta_{\pi}}^{\mathfrak{F}}(G) / O_{\pi}(G) \in \mathfrak{F}.$$

Так как в любой группе G подгруппа $\Phi_{\theta_p}(G)$ обладает свойством C_p , то при $\pi = \{p\}$ получаем следующий результат.

Следствие 4.2.6. Пусть \mathfrak{F} – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) \neq G$. Тогда

$$\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) / O_p(G) = \Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G)).$$

Следствие 4.2.8. Пусть θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $\overline{\Phi}_{\theta_{\pi}}^{\mathfrak{F}}(G) \neq G$. Если \mathfrak{F} – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, то $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

В случае, когда θ является тривиальным, то из теоремы 4.2 получается ещё ряд соответствующих утверждений.

Литература

1. Frattini, G. Intorno alla generazione dei gruppi di operazioni / G. Frattini // Atti Acad. Dei Lincei. – 1885. – Vol. 1. – P. 281–285.
2. Gaschütz, W. Über die Φ -Untergruppen endlicher Gruppen / W. Gaschütz // Math. Z. – 1953. – Vol. 58. – P. 160–170.
3. Deskins, W. A condition for the solvability of a finite group / W. Deskins // III. J. Math. – 1961. – Vol. 5, № 2. – P. 306–313.
4. Шеметков, Л. А. Формации конечных групп / Л. А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 267 с.
5. Селькин, М. В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М. В. Селькин. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
6. Кондратьев, А. С. Конечные группы. Итоги науки и техники / А. С. Кондратьев, А. А. Махнев, А. И. Старостин. – М. : ВИНТИ, 1986. – С. 3–120.
7. Carter, R. The \mathfrak{F} -normalizers of a finite soluble group / R. Carter, T. Hawkes // III. J. Math. – 1967. – Vol. 5, № 2. – P. 175–202.
8. Шеметков, Л. А. Ступенчатые формации групп / Л. А. Шеметков // Матем. сб. – 1974. – Т. 94, № 4. – С. 628–648
9. Borodich, R. V. A generalized Frattini subgroup / R. V. Borodich // Asian-European Journal of Mathematics. – 2019. – № 14 (02). – DOI : 10.1142/S1793557121500261.
10. Бородич, Р. В. О пересечении максимальных подгрупп конечных групп / Р. В. Бородич // Укр. мат. журн. – 2019. – Т. 71, № 11. – С. 1455–1465.
11. Скиба, А. Н. Алгебра формаций / А. Н. Скиба. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 240 с.
12. Бородич Р. В. О влиянии индексов A -допустимых θ -подгрупп на их пересечения / Р. В. Бородич // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2024. – №6 (147). – С. 70–74.

О стационарном режиме в СМО с конечным числом приборов и разнотипными заявками

В.В. БУРАКОВСКИЙ

Исследуется система массового обслуживания (СМО), состоящая из конечного числа N приборов, в которую поступают требования (заявки) n типов. Входящий поток заявок предполагается простейшим с интенсивностью λ , но таким, что каждая заявка с вероятностью $p(i), 1 \leq i \leq n$, независимо от предыдущих, оказывается i -го типа. Очередь для заявок может быть неограниченной. Обслуживание происходит в порядке поступления. Заявки различных типов требуют различного обслуживания. Приведены векторно-матричные уравнения, позволяющие вычислить стационарные вероятности СМО.

Ключевые слова: система массового обслуживания, прибор, заявка, простейший поток, стационарные вероятности.

The queuing system with finite number N of servers and customers of n different types is studied. The customer arrival stream is assumed to be independent Poisson process with rate λ , but any customer with probability $p(i), 1 \leq i \leq n$, becomes of type i . The queue for customers may be infinite. The service discipline is FIFO. The vector-matrix equations were obtained for calculating the steady-state probabilities of the queueing system.

Keywords: queueing system, server, customer, Poisson flow, steady-state probabilities.

Введение. Многие реально протекающие процессы обслуживания на транспорте, в торговле, медицине, экономике и других сферах можно изучать, исходя из соответствующих им математических моделей систем обслуживания. В теории массового обслуживания интенсивно разрабатываются методы анализа и оптимизации процессов обслуживания требований (заявок) на вычисления с использованием компьютеров.

Системы массового обслуживания (СМО) широко используются для математического моделирования сложных технических структур: в сетях связи, вычислительных комплексах, транспортных системах, различных диспетчерских службах и т. п.

В работе приводится описание математической модели СМО с конечным числом приборов, заявками нескольких типов, требующими различного времени обслуживания [1, с. 61]. Проводится исследование стационарного режима в изучаемой СМО, составляются уравнения равновесия для стационарных вероятностей состояний и получена процедура для их расчета.

1. Описание математической модели. Рассмотрим СМО с N приборами, в которую поступают заявки n типов. Входящий поток является простейшим с интенсивностью λ , но таким, что с вероятностью $p(i), 1 \leq i \leq n$, каждая заявка, независимо от предыдущих, оказывается i -го типа [2, с. 14].

При поступлении в СМО заявки, когда все приборы заняты, она встает в очередь с неограниченным числом свободных мест. Обслуживание производится в порядке поступления. Различные типы заявок. Предполагается разное время обслуживания для различных типов заявок. Время обслуживания в СМО распределено по показательному закону с интенсивностями $\mu_k, 1 \leq k \leq n$, где k – тип заявки. Для определенности будем предполагать, что

$$p(k) > 0, \sum_{k=1}^n p(k) = 1.$$

Состоянием СМО будем называть вектор, состоящий из $N + 1$ числа (l, i, \dots, j, m) , где l – общее количество заявок, находящихся в СМО, i – номер типа заявки, обслуживаемой на первом приборе; j – номер типа заявки, обслуживаемой $(N-1)$ -м приборе; m – тип заявки, обслуживаемой на N -ом приборе. Для унификации обозначений будем считать, что если в СМО нет ни одной заявки, то она находится в состоянии $(0, 0, \dots, 0, 0)$.

Предположим, что в СМО существует стационарный режим. Через $P(l, i, \dots, j, m)$ обозначим стационарную вероятность того, что СМО находится в состоянии (l, i, \dots, j, m) . Процесс изменения состояний в СМО будет Марковским, и получаем следующие уравнения для вероятностей состояний:

$$N\lambda P(0, 0, \dots, 0, 0) = \sum_{k=1}^n \mu_k P(1, 0, \dots, 0, k) + \sum_{j=1}^n \mu_j P(1, 0, \dots, j, 0) + \dots + \sum_{i=1}^n \mu_i P(1, i, \dots, 0, 0);$$

$$(\lambda + \mu_k)P(1, 0, \dots, 0, k) = \sum_{j=1}^n \mu_j P(2, 0, \dots, j, k) + \dots + \sum_{i=1}^n \mu_i P(2, i, \dots, 0, k) + \lambda p(k)P(0, 0, \dots, 0, 0);$$

.....

$$(\lambda + \mu_i)P(1, i, 0, \dots, 0, 0) = \sum_{r=1}^n \mu_r P(2, i, r, \dots, 0, 0) + \dots + \sum_{k=1}^n \mu_k P(2, i, \dots, 0, k) + \lambda p(i)P(0, 0, \dots, 0, 0);$$

$$(\lambda + \mu_i + \dots + \mu_j + \mu_k)P(l, i, \dots, j, k) = \lambda P(l-1, i, \dots, j, k) + p(i) \sum_{r=1}^n P(l+1, r, \dots, j, k) \mu_r +$$

$$+ p(k) \sum_{s=1}^n P(l+1, i, \dots, j, s) \mu_s.$$

Суммируя полученные уравнения равновесия, получим следующее уравнение:

$$\lambda \sum_{i=1}^n \dots \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n P(l, i, \dots, j, k) = \sum_{i=1}^n \dots \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (\mu_i + \dots + \mu_j + \mu_k) P(l+1, i, \dots, j, k).$$

Данное соотношение получается при рассмотрении такого сечения в графе переходов изучаемой СМО, которое отделяет состояние (l, i, \dots, j, k) от состояния $(l+1, i, \dots, j, k)$. Однако, если перенумеровать упорядоченные наборы (i, \dots, j, k) через m , то состояние СМО можно задавать парой чисел (l, m) . Если $l=0$, то пара $(0, 0)$ соответствует состоянию $(0, 0, \dots, 0)$, при $1 \leq l \leq N$ пар вида (l, m) всего nC_N^l , а в случае $l \geq N$ таких состояний n^N .

Будем называть множество $\{(l, m) | m \in L\}$ l -ым уровнем. Обозначим через $P(l)$ вектор стационарных вероятностей l -го уровня.

2. Процедура определения стационарных вероятностей СМО. Очевидно, что с каждого уровня можно перейти на соседний, а при $l=0$ $L=\{0\}$, при $1 \leq l \leq N-1$ $L=\{1, 2, \dots, nC_N^l\}$, $l \geq N$ имеем $L=\{1, 2, \dots, n^N\}$. Процедура перехода описывается следующими векторно-матричными уравнениями:

$$\pi Q = 0, \pi E = 1.$$

Здесь $\pi = (P(0), P(1), P(2), P(3), \dots)$, E – единичный вектор-столбец, Q – инфинитезимальная матрица, имеющая следующий блочный вид: $Q = \{A_{ij} | i, j \in \{0, 1, 2, \dots\}, |i-j| \leq 1\}$.

Для $l \geq N$ введем следующие обозначения: $A_{ij} = A_1$ при $l > j$, $A_{ll} = A_2$, $A_{ij} = A_3$ при $l < j$. Из соотношения $\pi Q = 0$ с учетом обозначений получим

$$\begin{aligned} P(0)A_{00} + P(1)A_{10} &= 0, \\ P(0)A_{01} + P(1)A_{11} + P(2)A_{21} &= 0, \\ \dots & \\ P(N-1)A_{N-1,N} + P(N)A_2 + P(N+1)A_1 &= 0, \\ P(N)A_3 + P(N+1)A_2 + P(N+2)A_1 &= 0, \\ \dots & \\ P(l-1)A_3 + P(l)A_2 + P(l+1)A_1 &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Для построения блоков A_1, A_2, A_3 введем следующие обозначения: $\mu = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \dots \\ \mu_n \end{pmatrix}$ – вектор-

столбец интенсивностей обслуживания заявок различных типов,
 $p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix}, p^T = (p(1), p(2), \dots, p(n)), I$ – единичная $(n \times n)$ матрица.

С учетом этих обозначений получаем, что блоки A_1 имеют вид:

$$A_1 = \begin{pmatrix} \mu p^T + \mu_1 p(1)I & \mu_1 p(2)I & \dots & \mu_1 p(n)I \\ \mu_2 p(1)I & \mu p^T + \mu_2 p(2)I & \dots & \mu_2 p(n)I \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_n p(1)I & \mu_n p(2)I & \dots & \mu p^T + \mu_n p(n)I \end{pmatrix}.$$

Таким образом, A_1 имеют размерность $(n^N \times n^N)$ и состоит из блоков $\{A_1^{(i,j)}\}$, которые можно записать в виде: $A_1^{(i,j)} = \delta_{i,j} \mu p^T + \mu_i p(j)I$, где $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$. Блоки A_3 также имеют размерность $(n^N \times n^N)$ и диагональный вид:

$$A_3 = \begin{pmatrix} \lambda I & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda I & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda I \end{pmatrix}.$$

Блоки A_2 диагонального вида $A_2 = \text{diag}\{-(\lambda + \mu_i + \mu_i + \dots + \mu_i) \mid i, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$ размерности $(n^N \times n^N)$.

Для стационарных вероятностей можно записать

$$P(l) = P(l-1)R, l > N. \tag{2}$$

Таким образом, последнее соотношение (1) будет иметь вид:

$$P(l-1)(A_3 + RA_2 + R^2 A_1) = 0.$$

Введем следующие обозначения: $\pi_k = \frac{\mu_k}{\lambda}, \pi = \begin{pmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \dots \\ \pi_n \end{pmatrix}, D = \frac{1}{\lambda_1} A_2$.

Учитывая вид блоков A_1 , получим: $A_1 = \mu p^T \otimes I + I \otimes \mu p^T$, откуда $\frac{1}{\lambda} A_1 = \pi p^T \otimes I + I \otimes \pi p^T$, где \otimes – символ кронекеровского произведения. Последнее соотношение из (1) примет вид: $P(l-1) + P(l)D + P(l+1)(\pi p^T \otimes I + I \otimes \pi p^T) = 0$. Или с учетом (2) $P(l-1) + P(l)(D + R(\pi p^T \otimes I + I \otimes \pi p^T)) = 0$. Таким образом, учитывая (2), имеем

$$R = -(D + R(\pi p^T \otimes I + I \otimes \pi p^T))^{-1}.$$

Полагая $R(0) = 0, R(k+1) = -(D + R(k)(\pi p^T \otimes I + I \otimes \pi p^T))^{-1}$, получим, что $R(k+1) \rightarrow R$ при $k \rightarrow \infty$ по методу Ньютона [3, с. 69].

Заключение. В статье описана математическая модель системы массового обслуживания [4, с. 23] с конечным числом N приборов. В нее поступают заявки нескольких типов,

требующие различного обслуживания. Входящий поток заявок является простейшим. Очередь для обслуживания – неограниченная. Заявки обслуживаются в порядке поступления. Время обслуживания распределено по показательному закону, но с разными интенсивностями в зависимости от типа заявки. Получены уравнения равновесия для стационарных вероятностей состояний исследуемой СМО, построены инфинитезимальные матрицы для векторно-матричных уравнений, приведена процедура для определения стационарных состояний произвольного уровня.

Литература

1. Burakovski, V. V. The investigation of the stationary regime in the queuing systems with finite number of servers and heterogeneous customers / V. V. Burakovski // *Queues : flows, systems, networks : Proceedings of the International conference «Modern mathematical methods of analysis and optimization of telecommunication networks»*, Gomel, 23–25 September, 2003. – BWWQT-2003. – Gomel, 2003. – Vol. 17. – P. 61–63.

2. Бураковский, В. В. Исследование стационарного режима в СМО с несколькими приборами и разнотипными требованиями / В. В. Бураковский // *Efektivní nástroje moderních věd – 2012 : materiály VIII mezinárodní vědecko-praktická konference, Praha, 27 dubna – 05 května 2012 roku. – Díl 29 : Matematika. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013. – P. 14–17.*

3. Neuts, M. F. Matrix-geometric solutions in stochastic models : An algorithmic approach / M. F. Neuts. – Baltimore, MD : Johns Hopkins University Press, 1981. – 332 p.

4. Бураковский, В. В. Исследование стационарного режима в СМО с двумя приборами и разнотипными требованиями / В. В. Бураковский // *Математические методы исследования сетей связи и сетей ЭВМ. – Минск : БГУ, 1990. – С. 23–24.*

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 03.02.2026

On the absence, non-uniqueness, and blow-up of classical solutions of mixed problems for some semilinear hyperbolic equations

J.V. RUDZKO

For semilinear hyperbolic equations of the form $\prod_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial t} - a_i \frac{\partial}{\partial x} + b_i \right) u(t, x) = f(t, x, u(t, x))$ given in the first quadrant and/or in a half-strip, we consider mixed problems with local boundary conditions, for which we study the issues related to the absence, non-uniqueness, and blow-up of classical solutions.

Keywords: absence of a solution, non-uniqueness of a solution, blow-up of a solution, mixed problem, Cauchy problem, matching conditions.

Для полулинейных гиперболических уравнений вида $\prod_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial t} - a_i \frac{\partial}{\partial x} + b_i \right) u(t, x) = f(t, x, u(t, x))$ заданных в первом квадранте и/или в полуполосе, мы рассматриваем смешанные задачи с локальными граничными условиями, для которых изучаем вопросы, связанные с отсутствием, неединственностью и разрушением классических решений.

Ключевые слова: отсутствие решения, неединственность решения, разрушение решения, смешанная задача, проблема Коши, условия соответствия.

1. Introduction. The present paper is a continuation of our work [1]. Here we will study mixed problems for the following nonlinear equations

$$\prod_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial t} - a_i \frac{\partial}{\partial x} + b_i \right) u(t, x) = f(t, x, u(t, x)), \quad (t, x) \in Q, \quad (1)$$

where $n \in \mathbb{N}$, a_i and b_i ($i = 1, 2, \dots, n$) are real numbers, Q is a set which will be specified later, and f is a function defined on the set $\overline{Q} \times \mathbb{R}$. We assume that $a_i \neq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) in order for the curve $t = 0$ to be noncharacteristic for Eq. (1). Without loss of generality, we also suppose $a_i \leq a_j$ if $i < j$. Let us denote $\Gamma = \overline{Q} \setminus \{(0, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$, $p^{(+)} = \text{card}(\{i \mid i \in \mathbb{N} \cap [1, n] \wedge a_i > 0\})$, and $p^{(-)} = \text{card}(\{i \mid i \in \mathbb{N} \cap [1, n] \wedge a_i < 0\})$. Let $l \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ and $r \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$, $l < r$. We denote

$$n^{(-)} = \begin{cases} p^{(-)}, & l = -\infty, \\ 0, & l \neq -\infty, \end{cases} \quad n^{(+)} = \begin{cases} p^{(+)}, & r = +\infty, \\ 0, & r \neq +\infty. \end{cases}$$

The meaning of the quantities $p^{(-)}$ and $p^{(+)}$ ($n^{(-)}$ and $n^{(+)}$) is how many conditions can (should) be set on the boundary $x = l$ and $x = r$, respectively, so that a mixed problem for Eq. (1) is well-posed.

Equation (1) is equipped with the initial conditions

$$\frac{\partial^i u}{\partial t^i}(0, x) = \varphi_i(x), \quad x \in \Gamma, \quad i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

and the boundary conditions

$$\mathcal{B}_i^{(-)}[u](t, l) = \mu_i^{(-)}(t), \quad t \in [0, \infty), \quad i = 1, \dots, n^{(-)}, \quad (3)$$

and

$$\mathcal{B}_i^{(+)}[u](t, r) = \mu_i^{(+)}(t), \quad t \in [0, \infty), \quad i = 1, \dots, n^{(+)}, \quad (4)$$

where $\mathcal{B}_i^{(\pm)}$ ($i = 0, 1, \dots, n^{(\pm)}$) are differential operators, which have the form $\mathcal{B}_i^{(\pm)} = \mathcal{P}_i^{(\pm)}(\partial_t, \partial_x)$, where $\mathcal{P}_i^{(\pm)}$ are some polynomials such that $\mathcal{P}_i^{(\pm)} \neq 0$. If l is infinite, then the conditions (3) are not specified. Again, if r is infinite, then the conditions (4) are not given¹. The quantity l is always infinite if $n^{(-)} = 0$, and the quantity r is always infinite if $n^{(+)} = 0$. Now we can specify that the set Q can be expressed in the following formula

¹ This differs from widely used understanding in the literature of the conditions (3) and/or (4) as conditions at the infinity when l and/or r is infinite, i. e., $u(t, \pm\infty) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} u(t, x)$.

$$Q = (0, \infty) \times (l, r), \quad (5)$$

which is obviously true if $l = -\infty$ and/or $r = +\infty$. Note that the case $l = -\infty \wedge r = +\infty$ leads to the absence of boundary conditions, and, therefore, the problem (1)–(4) degenerates into the Cauchy problem (1)–(2)², where $Q = (0, \infty) \times \mathbb{R}$. We have considered the particular cases of the Cauchy problem (1)–(2): 1) The numbers a_i are different, $b_i = 0$ ($1, 2, \dots, n$) [2]. 2) The numbers a_i are equal to a , and the numbers b_i are equal to b [3].

2. Nonexistence of solutions. In this section, we consider the issues related to the nonexistence of the mixed problem (1)–(4). The most obvious case when this happens is when the matching conditions are not met.

Let us consider the following case:

$$\mathcal{B}_i^{(\pm)} = \frac{\partial^{j^{(\pm)}(i)}}{\partial x^{j^{(\pm)}(i)}}, \quad (6)$$

where $j^{(\pm)} : \mathbb{N} \cap [1, n^{(\pm)}] \mapsto S^{(\pm)}$ is a bijective mapping, where $S^{(\pm)} \subset \mathbb{N}$. Without loss of generality, we assume that $j^{(\pm)}(i_1) < j^{(\pm)}(i_2)$ if $i_1 < i_2$. Let

$$\tilde{n} = \max(j^{(-)}(n^{(-)}), j^{(+)}(n^{(+)}) , n).$$

According to the definition of a classic solution, it should be found in the class $C^{\tilde{n}}(\overline{Q})$.

Let us differentiate the initial conditions (2) with respect to the variable x and obtain

$$\frac{\partial^{i+j} u}{\partial x^j \partial t^i}(0, x) = D^j \varphi_i(x), \quad x \in \Gamma, \quad i = 0, 1, \dots, n-1, \quad j = 1, 2, \dots, \tilde{n} - i. \quad (7)$$

In a similar way, differentiating the boundary conditions (2) and (4) with respect to the variable t , we have

$$\frac{\partial^{k+j^{(-)}(i)} u}{\partial t^k \partial x^{j^{(-)}(i)}}(t, l) = D^k \mu_i^{(-)}(t), \quad t \in [0, \infty), \quad i = 1, 2, \dots, n^{(-)}, \quad k = 1, 2, \dots, \tilde{n} - j^{(-)}(i) \quad (8)$$

and

$$\frac{\partial^{k+j^{(+)}(i)} u}{\partial t^k \partial x^{j^{(+)}(i)}}(t, r) = D^k \mu_i^{(+)}(t), \quad t \in [0, \infty), \quad i = 1, 2, \dots, n^{(+)}, \quad k = 1, 2, \dots, \tilde{n} - j^{(+)}(i) \quad (9)$$

Since $u \in C^{\tilde{n}}(\overline{Q})$, the formulas (7)–(9) imply the following set of equations

$$D^j \varphi_i(l) = D^k \mu_s^{(-)}(0), \quad j+i = k + j^{(-)}(s) \leq \tilde{n}, \quad (10)$$

$$D^j \varphi_i(r) = D^k \mu_s^{(+)}(0), \quad j+i = k + j^{(+)}(s) \leq \tilde{n}. \quad (11)$$

In the case of infinite l and/or r , the corresponding condition (10) and/or (11) is not required. Therefore, it is better to write them as follows

$$l \text{ is finite and } D^j \varphi_i(l) = D^k \mu_s^{(-)}(0), \quad j+i = k + j^{(-)}(s) \leq \tilde{n}, \quad (12)$$

$$r \text{ is finite and } D^j \varphi_i(r) = D^k \mu_s^{(+)}(0), \quad j+i = k + j^{(+)}(s) \leq \tilde{n}. \quad (13)$$

It allows us to formulate the following statement.

Theorem 1. *If the matching conditions (12) and (13) fail for given functions φ_i ($i = 0, 1, \dots, n-1$) and $\mu_j^{(\pm)}$ ($j = 1, 2, \dots, n^{(\pm)}$), then, for any smoothness of these functions, the mixed problem (1)–(4) and (6) does not have a classical solution defined on the set \overline{Q} .*

Note that

$$\frac{\partial^n u}{\partial t^n}(t, l) = D^n \mu_1^{(-)}(t), \quad t \in [0, \infty), \quad (14)$$

if

$$j^{(-)}(1) = 0 \quad (15)$$

and l is finite. On the other side, from Eq. (1) we can derive

$$\frac{\partial^n u}{\partial t^n}(t, x) = \mathcal{P}(\partial_t, \partial_x)[u](t, x) + f(t, x, u(t, x)), \quad (t, x) \in \overline{Q}, \quad (16)$$

² In the Cauchy problem (1)–(2), the values l and r can be finite. In this case $Q = \text{Conv}\{(0, l), (0, r), ((r-l)/(a_n - a_1), (la_n - ra_1)/(a_n - a_1))\}$ if $a_1 \neq a_n$, or $Q = \{(t, x) \mid x + a_1 t \in (l, r)\}$ if $a_1 = a_n$.

where \mathcal{P} is some polynomial. To find the form of the polynomial \mathcal{P} , we need the following lemma.

Lemma 1. *The following equality is true:*

$$\prod_{i=1}^n (T - a_i X + b_i) = \sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,n \\ i+j \leq n}} p_{i,j}^{(n)} T^i X^j, \quad (17)$$

where

$$\begin{aligned} p_{1,0}^{(1)} &= 1, & p_{0,1}^{(1)} &= -a_1, & p_{0,0}^{(1)} &= b_1, \\ p_{i,j}^{(m)} &= \mathcal{J}(i+j \leq m-1, b_m p_{i,j}^{(m-1)}) + \mathcal{J}(i+j \leq m \wedge i-1 \geq 0 \wedge j \geq 0, b_m p_{i-1,j}^{(m-1)}) + \\ &\quad + \mathcal{J}(i+j \leq m \wedge i \geq 0 \wedge j-1 \geq 0, -a_m p_{i,j-1}^{(m-1)}), \quad 2 \leq m \leq n \end{aligned} \quad (18)$$

where $\mathcal{J}(\text{condition}, j_2)$ gives j_2 if *condition* evaluates to true, and 0 if it evaluates to false.

Proof. For $n=1$ the formula (17) with (18) is obviously correct. For $m > 1$ the transition formula (18) follows from the expression

$$\begin{aligned} &\left(\sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,m-1 \\ i+j \leq m-1}} p_{i,j}^{(m-1)} T^i X^j \right) (T - a_m X + b_m) = \\ &= \sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,m-1 \\ i+j \leq m-1}} p_{i,j}^{(m-1)} T^{i+1} X^j - \sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,m-1 \\ i+j \leq m-1}} a_m p_{i,j}^{(m-1)} T^i X^{j+1} + \sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,m-1 \\ i+j \leq m-1}} b_m p_{i,j}^{(m-1)} T^i X^j. \end{aligned}$$

The lemma is proved.

Therefore, the polynomial \mathcal{P} has the form

$$\mathcal{P}(\partial_t, \partial_x) = - \sum_{\substack{i=0,1,\dots,n-1 \\ j=0,1,\dots,n \\ i+j \leq n}} p_{i,j}^{(n)} \partial_t^i \partial_x^j, \quad (19)$$

where the coefficients $p_{i,j}^{(n)}$ are given by the formulas (18).

Note that the relations (7) allow us to calculate the quantities $\partial_t^i \partial_x^j u(0, l)$. From the expressions (7), (14), and (16) we obtain

$$D^n \mu_1^{(-)}(0) = f(0, l, \varphi(l)) - \sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,n-1 \\ j=0,1,\dots,n \\ i+j \leq n}} p_{i,j}^{(n)} D^j \varphi_i(l). \quad (20)$$

It allows us to formulate the following statement.

Theorem 2. *Let l be finite and $j^{(-)}(1) = 0$. If the matching condition (20) fails for given functions φ_i ($i = 0, 1, \dots, n-1$) and $\mu_1^{(-)}$, then, for any smoothness of these functions, the mixed problem (1)–(4) and (6) does not have a classical solution defined on the set \overline{Q} .*

The following theorem can be proved in a similar way.

Theorem 3. *Let r be finite and $j^{(+)}(1) = 0$. If the matching condition*

$$D^n \mu_1^{(+)}(0) = f(0, r, \varphi(r)) - \sum_{\substack{i,j=0,1,\dots,n-1 \\ j=0,1,\dots,n \\ i+j \leq n}} p_{i,j}^{(n)} D^j \varphi_i(r) \quad (21)$$

fails for given functions φ_i ($i = 0, 1, \dots, n-1$) and $\mu_1^{(+)}$, then, for any smoothness of these functions, the mixed problem (1)–(4) and (6) does not have a classical solution defined on the set \overline{Q} .

3. Nonuniqueness of solutions. In this section, we consider the problem (1)–(4) in the following case

$$\begin{aligned} f(t, x, u) &:= u^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1, \quad \mu_i^{(\pm)} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n^{(\pm)}, \quad \varphi_j = 0, \quad j = 0, 1, \dots, n-1, \\ \mathcal{B}_i^{(-)}[(t, x) \mapsto g(t)](t, l) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n^{(-)}, \quad \mathcal{B}_j^{(+)}[(t, x) \mapsto g(t)](t, r) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n^{(+)}, \\ b_i &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (22)$$

Obviously, the problem (1)–(4) has the trivial solution $u \equiv 0$. To find non-trivial solutions, consider the following ansatz

$$u(t, x) = \beta t^\gamma, \quad (t, x) \in \overline{Q}, \quad (23)$$

where β and γ are some real numbers. Note that the function u of the form (23) will satisfy the conditions (2)–(4) with (22). We substitute the ansatz (23) into Eq. (1) with (22) and obtain

$$\text{FactorialPower}(\gamma, n) \beta t^{\gamma-n} = \beta^\alpha t^{\gamma\alpha}, \quad (24)$$

where we have denoted

$$\text{FactorialPower}(\gamma, n) = \frac{\Gamma(\gamma + 1)}{\Gamma(\gamma - n + 1)},$$

where Γ is the gamma function. The equality (24) leads to the system of equations

$$\gamma - n = \gamma\alpha, \quad \text{FactorialPower}(\gamma, n)\beta = \beta^\alpha,$$

which has a solution

$$\gamma = \frac{n}{1-\alpha}, \quad \beta = \text{FactorialPower}\left(\frac{n}{1-\alpha}, n\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$$

Consequently, one nontrivial solution to the problem (1)–(4) and (22) has the form

$$u_p(t, x) = \text{FactorialPower}\left(\frac{n}{1-\alpha}, n\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} t^{\frac{n}{1-\alpha}}, \quad (t, x) \in \overline{Q}. \quad (25)$$

Furthermore, we can easily show that the ‘glued’ solution [4, p. 14–15]

$$u_{p;s}(t, x) = \begin{cases} 0, & t \in [0, s), \\ u_p(t-s, x), & t \in [s, \infty), \end{cases}$$

with parameter $s > 0$ also satisfies the problem (1)–(4) and (22). Thus, we have built an infinite set of nontrivial classical solutions to the problem (1)–(4) and (22).

It allows us to formulate the following statement.

Theorem 4. *The problem (1)–(4) and (22) has an infinite number of global classical solutions defined on \overline{Q} and no unique local classical solution.*

4. Blow-up of solutions. In this section, we consider the problem (1)–(4) in the case of non-negative nonlinearities, namely:

$$\begin{aligned} f(t, x, u) &:= g(u), \quad g \in C([0, \infty)), \quad g([0, \infty)) \subseteq [0, \infty), \\ \mu_i^{(\pm)} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n^{(\pm)}, \quad \varphi_0 = \text{const}, \quad \varphi_j = 0, \quad j = 1, \dots, n-1, \\ \mathcal{B}_i^{(-)}[(t, x) \mapsto g(t)](t, l) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n^{(-)}, \\ \mathcal{B}_j^{(+)}[(t, x) \mapsto g(t)](t, r) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, n^{(+)}, \\ b_i &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (26)$$

If $g(0) = 0$ and $\varphi_0 = 0$, then the problem (1)–(4) and (26) has a trivial solution $u \equiv 0$, which, obviously, does not have the blow-up. So, we assume $\varphi_0 = 0$ and seek nontrivial solution to the problem (1)–(4) and (26), which blows up in a finite time. To do this, we consider an ansatz of the form

$$u(t, x) = u(t), \quad (t, x) \in \overline{Q}, \quad (27)$$

which leads us to the following ordinary differential equation

$$D^n u(t) = g(u(t)), \quad (28)$$

with the initial conditions

$$D^i u(0) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (29)$$

Let us check [5] the necessary condition for the existence of nontrivial solutions of Eq. (28) with the conditions (29). It lies in the fact that the integral

$$\int_0^\delta g(x) x^{\frac{2-n}{n-1}} dx$$

must converge for some delta $\delta > 0$. Since $g \in C([0, \infty))$, we have $g(x) \leq M$ for all $x \in [0, 1]$, where M is some positive number. Thus,

$$\int_0^1 g(x) x^{\frac{2-n}{n-1}} dx \leq M \int_0^1 x^{\frac{2-n}{n-1}} dx = M(n-1), \quad n \geq 2.$$

Consequently, the Cauchy problem (28), (29) has non-trivial solutions.

It is known [5] that the problem (28), (29) has a positive solution u , which blows up in a finite time if $n \geq 2$ and the integral

$$\int_0^\infty (h(x))^{\frac{1}{1-n}} dx$$

converges, where

$$h(x) = x^{\frac{n-2}{n}} \left(\int_0^x (x-z)^{n-2} g(z) z^{\frac{n-2}{1-n}} dz \right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Since the function u of the form (27) satisfies the conditions (2)–(4) with (26) and $\varphi_0 = 0$, we can formulate the following theorem.

Theorem 5. *Let us assume $n \geq 2$ and $\varphi_0 = 0$. The mixed³ problem (1)–(4) and (26) has a nontrivial positive solution, i. e., $u(t, x) > 0$ for all $(t, x) \in Q \setminus \Gamma$, which blows up in a finite time, i. e., there exists $T_* > 0$ such that $\lim_{t \rightarrow T_* - 0} u(t, x) = \infty$, if the integral*

$$\int_0^\infty x^{\frac{2-n}{n^2-n}} \left(\int_0^x (x-z)^{n-2} g(z) z^{\frac{n-2}{1-n}} dz \right)^{\frac{1}{n}} dx$$

converges.

If $n = 1$, then we can use the Osgood test⁴ for the blow-up in a finite time of a nontrivial solution of the Cauchy problem (28), (29) from the paper [6]. It has the form

$$g \in C_{loc}^{0,1}([0, \infty)), \quad \text{Image}(g) \subseteq [0, \infty), \quad g \text{ is nondecreasing}, \quad (30)$$

$$T_* = \int_{\varphi_0}^\infty \frac{dz}{g(z)} < \infty. \quad (31)$$

It allows us to formulate the following theorem.

Theorem 6. *Let us assume $n = 1$. The mixed problem (1)–(4) and (26) has a nontrivial solution, which blows up in a finite time if the conditions (30) and (31) are satisfied. The blow-up time T_* is determined by the formula (31).*

5. Conclusions. In this article, we have derived the sufficient conditions for the absence, non-uniqueness, and blow-up of classical solutions of mixed and initial value problems for some semilinear hyperbolic equations.

Funding. The work was supported by state program for scientific research «Interdisciplinary and Synergetic Research» («Convergence–2030»), subprogram «Modern Mathematical Methods and Their Applications», task 1.05 «Classical Solutions, Development of New Methods for Studying Problems of the Theory of Partial Differential Equations», R&D 1.05.1 «Classical Methods for Solving and Proving the Hadamard Well-Posedness of Problems for Partial Differential Equations».

References

1. Korzyuk, V. I. On the absence, non-uniqueness, and blow-up of classical solutions of mixed problems for the telegraph equation with a nonlinear potential / V. I. Korzyuk, J. V. Rudzko // *Problems of Physics, Mathematics and Technics.* – 2024. – Iss. 2 (59). – P. 73–78.
2. Korzyuk, V. I. Classical solution to the cauchy problem for a semilinear hyperbolic equation in the case of two independent variables / V. I. Korzyuk, J. V. Rudzko // *Russian Mathematics.* – 2024. – Vol. 68, № 3. – P. 41–52.
3. Korzyuk, V. I. Cauchy problem for a semilinear nonstrictly hyperbolic equation on a half-plane in the case of a single characteristic / V. I. Korzyuk, J. V. Rudzko // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* – 2024. – Vol. 27, № 2. – P. 104–122.
4. Amel'kin, V. V. *Differential equations* / V. V. Amel'kin. – Minsk : BGU, 2012. – 288 p.
5. Mydlarczyk, W. A singular initial value problem for the equation $u^{(n)}(x) = g(u(x))$ / W. Mydlarczyk // *Annales Polonici Mathematici.* – 1998. – Vol. 68. – P. 177–189.
6. Małolepszy, T. Osgood type condition for the Volterra integral equations with bounded and nonincreasing kernels / T. Małolepszy // *Journ. of Mathem. Analys. and Applic.* – 2014. – Vol. 410. – P. 411–417.

³ In the case of the Cauchy problem, we must additionally require that at least one of quantities r and l be infinite or the value $r-l$ be big enough.

⁴ <https://www.ub.edu/probabilitats-seminaribcn/Curs2011/leon.pdf>.

Сравнительный анализ антенных систем Ka-диапазона с сетью питания на основе несимметричной и симметричной полосковых линий

И.А. ФАНЯЕВ¹, А.А. ТИМОШЕНКО¹, А.Л. САМОФАЛОВ¹, И.В. СЕМЧЕНКО², С.А. ХАХОМОВ¹

В работе проведено численное исследование антенных систем Ka-диапазона с сетями питания, реализованными на основе несимметричной и симметричной полосковых линий. Рассмотрены конструкции делителей мощности, систем распределения питания и патч-антенн, выполнен анализ их S-параметров и амплитудно-фазовых характеристик. Показано, что симметричная полосковая линия обеспечивает более равномерное распределение мощности и снижение паразитного излучения. Установлено, что несимметричная линия позволяет получить более высокий коэффициент усиления, однако приводит к ухудшению диаграммы направленности. Определены компромиссы между электродинамическими характеристиками и технологической реализуемостью. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании антенных систем миллиметрового диапазона.

Ключевые слова: T-образный делитель мощности, патч-антенна, S-параметры, диаграмма направленности, антенная система.

The paper presents a numerical study of Ka-band antenna systems with feeding networks implemented using asymmetric and symmetric stripline technologies. Power dividers, feeding network architectures, and patch antennas are investigated, and their S-parameters as well as amplitude-phase characteristics are analyzed. It is shown that the symmetric stripline provides more uniform power distribution and reduced parasitic radiation. At the same time, the asymmetric line enables a higher gain, but leads to degradation of the radiation pattern. Trade-offs between electromagnetic performance and fabrication feasibility are identified. The obtained results can be applied in the design of millimeter-wave antenna systems.

Keywords: T-junction power divider, patch antenna, S-parameters, radiation pattern, antenna system.

Введение. Современные антенные системы миллиметрового диапазона, в частности Ka-диапазона, широко применяются в радиолокации, спутниковой связи и системах 5G/6G, что предъявляет повышенные требования к их энергетическим и пространственным характеристикам [1]–[3]. При проектировании таких систем ключевую роль играет выбор типа линии передачи для реализации сети питания, поскольку она определяет не только электродинамические характеристики антенной системы, но и технологическую реализуемость устройства в целом.

Наиболее распространёнными вариантами планарных передающих структур являются несимметричная и симметричная полосковые линии. Это два фундаментальных класса планарных передающих структур, широко используемых в СВЧ- и миллиметровых диапазонах [4], однако их конструктивные различия определяют существенные отклонения в электромагнитных характеристиках, технологической реализации и областях применения [5]. Несимметричная линия [6], [7] обладает несколько более низкими диэлектрическими потерями при малой толщине подложки и упрощённым возбуждением, однако она подвержена излучению на резких изгибах, неоднородностях и открытых концах, чувствительна к влиянию соседних трасс и внешних электромагнитных полей из-за отсутствия верхнего экрана, тогда как симметричная линия, будучи полностью замкнутой между двумя заземлениями, практически не излучает, обеспечивает высокую степень изоляции между соседними трактами, устойчива к внешним помехам и сохраняет стабильность фазы, но требует многослойной металлизации, точного контроля толщины диэлектрика и юстировки слоёв, что усложняет изготовление и повышает стоимость [8].

Несмотря на обширные исследования, посвящённые отдельным аспектам применения указанных линий, вопросы комплексного сравнительного анализа их влияния на характеристики антенных систем Ka-диапазона остаются недостаточно изученными. В частности, требуется оценка компромиссов между электродинамическими характеристиками (коэффициент

усиления, диаграмма направленности, уровень заднего излучения) и технологической реализуемостью при использовании несимметричной и симметричной полосковых линий в составе сети питания антенной решётки.

Целью настоящей работы является численное исследование и сравнительный анализ антенных систем Ка-диапазона с сетями питания, реализованными на основе несимметричной и симметричной полосковых линий, с оценкой их S-параметров, амплитудно-фазовых характеристик и параметров излучения.

Моделирование делителя на различных видах полосковых линий. В качестве диэлектрика взят материал Rogers 4350В с медным фольгированием толщиной 17 мкм, относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,48$ и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0037. Для несимметричной полосковой линии (рисунок 1, а) толщина диэлектрика составила $h = 0,338$ мм. Симметричная полосковая линия (рисунок 1, б) состояла из 3-х слоев меди, двух слоев диэлектрика с толщинами $h_1 = 0,354$ мм и $h_3 = 0,338$ мм и связующего слоя препрега Rogers 4450В толщиной $h_2 = 0,1$ мм, относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,54$ и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,004.

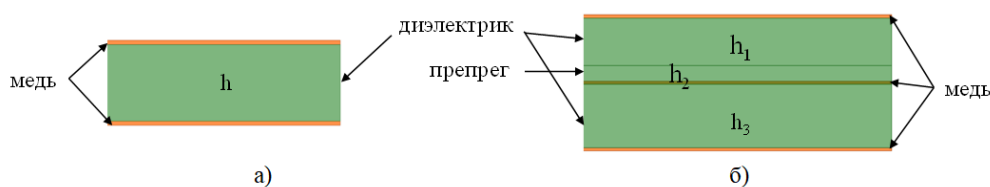


Рисунок 1 – Варианты полосковых линий: а) несимметричная, б) симметричная

На рисунке 2 представлены планарные конструкции Т-образного делителя мощности, реализованные на несимметричной (а) и симметричной (б) полосковых линиях, и приведены их частотные зависимости S-параметров. Топология сформирована разветвлением входного тракта на два выходных плеча, одно из которых содержит ступенчатый переход ширины, выполняющий функцию импедансного трансформатора. Расширенный участок линии вблизи узла тройника компенсирует паразитную ёмкостную реактивность разветвления и согласует волновое сопротивление входа с приведённым импедансом параллельно соединённых выходов, обеспечивая минимизацию коэффициента отражения и равномерное распределение СВЧ-мощности. Входное волновое сопротивление обоих Т-делителей составляло 50 Ом, а сопротивление трансформаторов по 35 Ом.

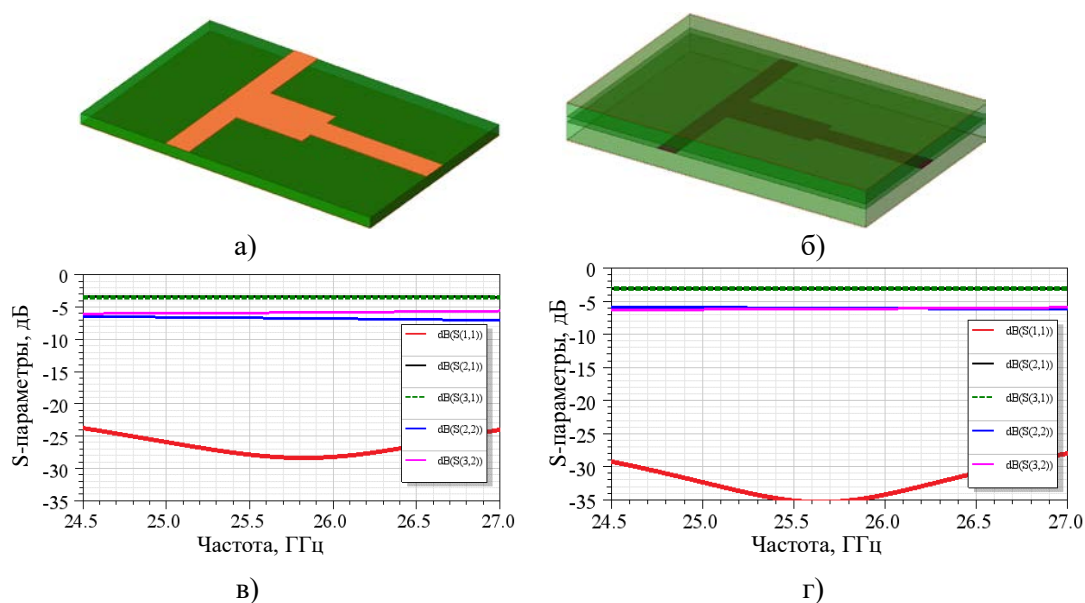


Рисунок 2 – Варианты конструкций Т-делителей на (а) несимметричной и (б) симметричной линиях, S-параметры (в) и (г) соответственно

T-делители имеют низкий коэффициент отражения от первого входа, настроены на равное деление мощности – коэффициенты передачи составили -3,4 дБ (рисунок 2, в) и -3,17 дБ (рисунок 2, г). Коэффициенты отражения от 2 и 3 входов, а также коэффициент связи $S_{2,3}$ не превышают -6 дБ.

Система питания. На основе T-делителей мощности были построены две системы питания, каждая на 32 выхода (рисунок 3). Расстояния между выходами по двум осям одинаковы и составили 7 мм. В первом варианте (рисунок 3, а) волновое сопротивление каждого выхода составляло 100 Ом. Во втором варианте (рисунок 3, б) – 50 Ом.

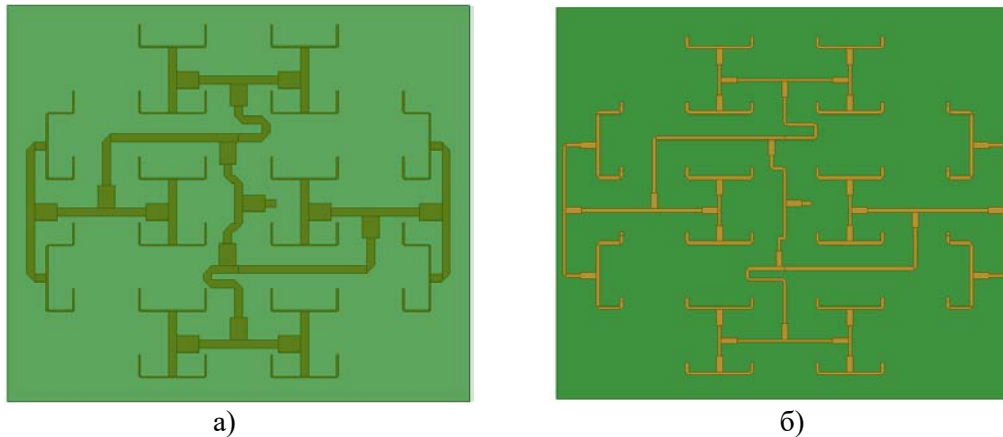


Рисунок 3 – Топологии двух вариантов систем питания, построенных на (а) несимметричной и (б) симметричной полосковых линиях

Различие выбора разных волновых сопротивлений обусловлено тем, что для симметричной линии с учетом толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрика расчетная ширина центрального полоска составила бы порядка 0,05 мм, что технологически нереализуемо или крайне затруднительно при использовании стандартных процессов фотолитографии и травления. В связи с этим для системы питания на симметричной полосковой линии целесообразнее выбирать более низкое волновое сопротивление (50 Ом), что позволяет увеличить ширину центрального проводника до технологически приемлемых значений (0,35 мм), сохраняя при этом приемлемый уровень согласования в составе устройства.

Ниже, на рисунке 4 представлены результаты численных расчетов фаз и амплитуд в зависимости от частоты для двух предложенных вариантов систем питания на 32 выхода.

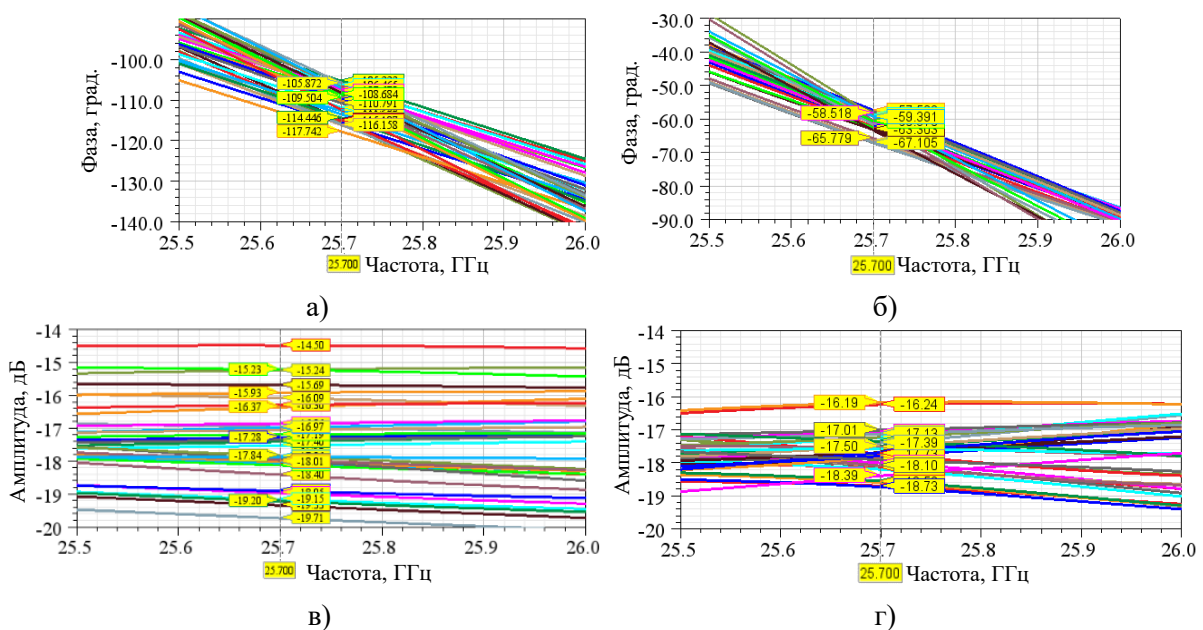


Рисунок 4 – Графики частотной зависимости фаз и амплитуд двух вариантов систем питания, построенных на (а, в) несимметричной и (б, г) симметричной полосковых линиях

Анализ результатов полученных графиков показал, что для системы питания, построенной на несимметричной полосковой линии, разброс фаз на всех выходах составил не более 12° , а разбаланс амплитуд на частоте 25,7 ГГц составил не более 5 дБ. А вот второй вариант показал чуть лучший результат – разброс фаз и амплитуд на частоте 25,7 ГГц на всех выходах составил не более 10° и 2,5 дБ соответственно.

Патч-антенны. На рисунке 5 представлены две конструкции патч-антенн. Обе антенны содержат прямоугольный металлический патч (с размерами $3,23 \times 2,42$ мм и $2,83 \times 1,8$ мм соответственно) в качестве излучающего элемента и полосковую линию питания. Передача мощности от линии питания к антенне осуществляется через щель в заземляющей подложке. В первом варианте (а) применяется узкая несимметричная линия с волновым сопротивлением 100 Ом, что обеспечивает непосредственное согласование с высоким входным сопротивлением патча в точке питания. Во втором варианте (б) используется более широкая 50-омная симметричная линия, согласованная с патчем через емкостную неоднородность в виде круглого металлического диска радиусом 0,5 мм в месте перехода от линии к излучающему элементу, что компенсирует реактивную составляющую импеданса и улучшает согласование антенны со стандартным 50-омным трактом.

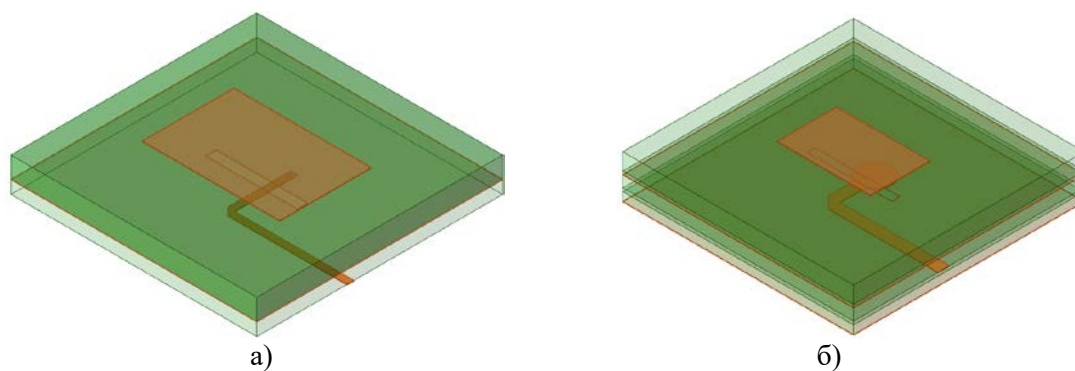


Рисунок 5 – Конструкции патч-антенн для двух вариантов согласования с питающей (а) несимметричной и (б) симметричной линией

Толщина диэлектрического слоя между патч-антеннами и заземляющей подложкой равна 0,508 мм. Обе антенны в процессе оптимизации параметров настроены на частоту 25,7 ГГц, при этом коэффициент отражения составил не более -26 дБ. Ширина диаграммы направленности для антенны (рисунок 5, а) составила в двух главных плоскостях 100° и 90° соответственно. Для второго варианта (рисунок 5, б) она составила в двух главных плоскостях 127° и 87° соответственно. Коэффициент усиления для двух антенн равен 3,4 дБ и 2,5 дБ соответственно.

Антенная система Ка-диапазона с сетью питания. С учетом всех представленных выше конструкций были построены две антенные системы с сетью питания на основе несимметричной и симметричной полосковых линий. На рисунке 6 представлены конструкции полученных антенных систем и их характеристики излучения. Общие размеры печатных плат составили 49×42 мм с толщинами 0,85 мм и 1,35 мм соответственно.

Из полученных полярных диаграмм направленности при частоте 25,7 ГГц следует существенное различие в качестве излучения двух антенных систем. Анализ рисунка 6, в показал, что диаграмма отличается высоким и симметричным коэффициентом усиления (максимум порядка 17,2 дБ). Однако открытая структура линии питания приводит к тому, что сам фидер начинает работать как паразитный излучатель. Это вызывает интерференцию полей, искажение диаграммы направленности, и самое главное, значительный рост уровня заднего лепестка, который достигает 6,8 дБ.

Анализ рисунка 6, г показал, что диаграмма имеет чуть пониженный максимум усиления (порядка 16 дБ) и выраженную асимметрию. Стоит отметить, что уровень излучения в заднюю полусферу относительно низкий и не превышает 0 дБ. Благодаря экранированию линии питания, паразитное излучение фидера отсутствует. Это указывает на эффективную работу излучателя при минимальном влиянии посторонних факторов.

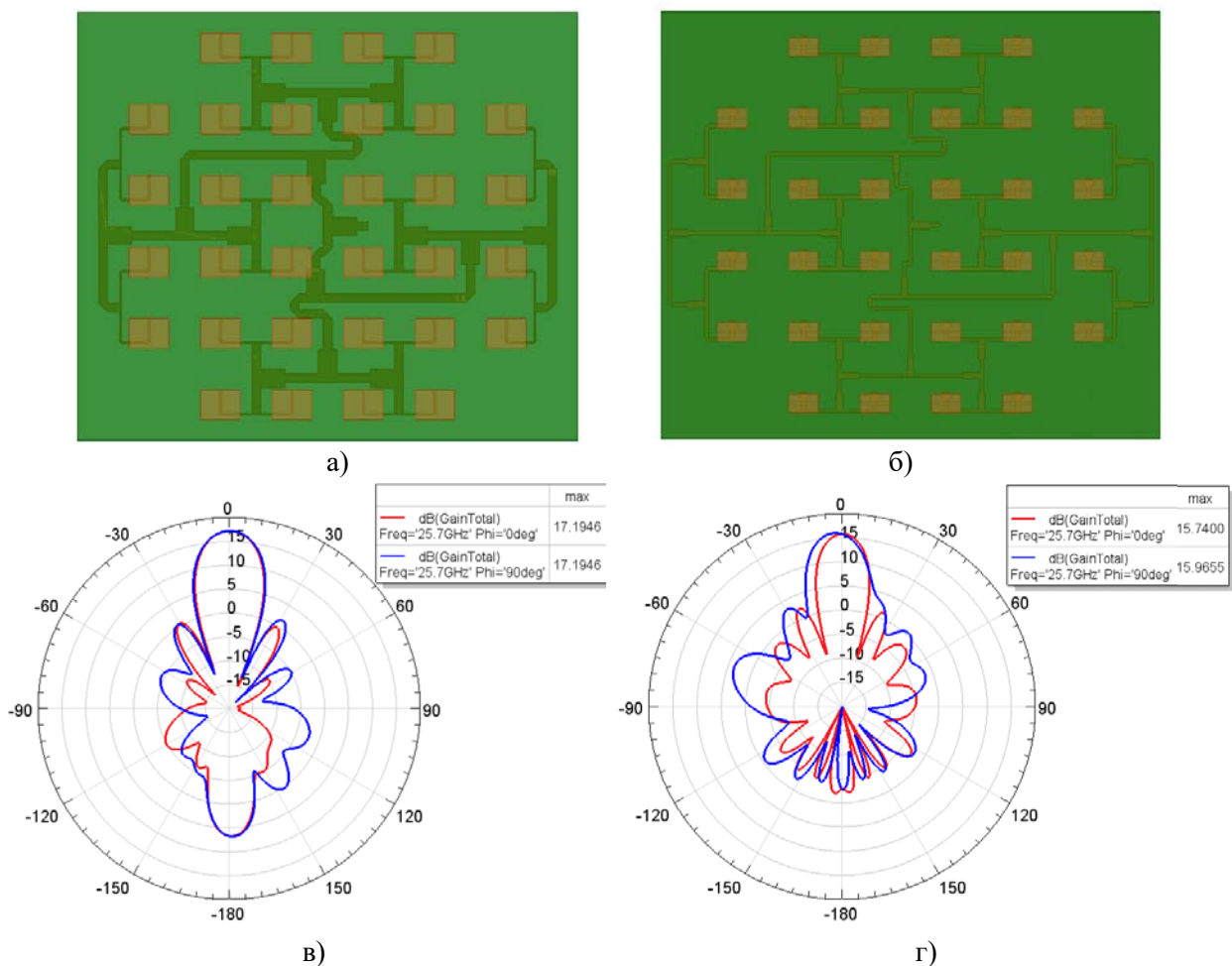


Рисунок 6 – Конструкции двух вариантов антенных систем, построенных на (а) несимметричной и (б) симметричной полосковых линиях, а также диаграммы направленности в двух главных плоскостях

Сравнительный анализ. Сравнение антенных систем на несимметричной и симметричной полосковых линиях показывает, что тип линии оказывает определяющее влияние как на распределение мощности, так и на характеристики излучения.

Система на симметричной линии демонстрирует более равномерные амплитудно-фазовые распределения (разброс фаз до 10° , амплитуд – до 2,5 дБ), что свидетельствует о лучшей электродинамической стабильности. В то же время несимметричная линия обеспечивает более высокий коэффициент усиления одиночного элемента и всей решетки (до 17,2 дБ), однако сопровождается выраженным паразитным излучением фидерной линии. Это приводит к искажению диаграммы направленности и увеличению уровня заднего лепестка (до 6,8 дБ). В системе на симметричной линии, напротив, паразитное излучение эффективно подавлено и уровень заднего лепестка не превышает 0 дБ, несмотря на несколько меньшее усиление (около 16 дБ).

Таким образом, несимметричная линия предпочтительна при приоритете максимального усиления и простоты реализации, тогда как симметричная линия обеспечивает более качественную диаграмму направленности и стабильность характеристик, что делает её более целесообразной для высокоточных антенных систем Ка-диапазона.

Заключение. В работе выполнено численное исследование двух антенных систем Ка-диапазона с сетями питания на основе несимметричной и симметричной полосковых линий. Показано, что при сопоставимых характеристиках согласования и эффективности деления мощности тип линии существенно влияет на амплитудно-фазовое распределение и качество излучения системы.

Установлено, что применение симметричной полосковой линии обеспечивает более высокую равномерность распределения мощности и подавление паразитного излучения фидерной линии, что приводит к формированию более качественной диаграммы направленности с низким уровнем заднего излучения. В то же время использование несимметричной линии позволяет достичь несколько большего коэффициента усиления, однако сопровождается ухудшением пространственных характеристик из-за влияния паразитных эффектов.

Следовательно, выбор типа полосковой линии должен осуществляться с учетом приоритетных требований к антенной системе: максимальное усиление и технологическая простота либо высокая стабильность характеристик и качество излучения. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного учета конструкции линии передачи при проектировании антенных систем миллиметрового диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Ф24КИТГ-005.

Литература

1. Pozar, D. M. Microwave engineering / D. M. Pozar. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. – 732 p.
2. Balanis, C. A. Antenna theory: Analysis and design / C. A. Balanis. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. – 1104 p.
3. Активная передающая бианизотропная метаповерхность с функцией управления фазой для B5G/6G приложений беспроводной связи / И. А. Фаняев [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 4 (65). – С. 103–107.
4. Verho, S. Design of a compact and minimalistic intermediate phase shifting feed network for Ka-band electrical beam steering / S. Verho, J. Y. Chung // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 4. – P. 1235.
5. Bahl, I. J. Microstrip lines and slotlines / I. J. Bahl. – 3rd ed. – Boston : Artech House, 2013. – 608 p.
6. Phase and polarization modulations using radiation-type metasurfaces / P. Xu [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2021. – Vol. 9, № 16. – P. 2100159.
7. Simple and comprehensive strategy to synthesize Huygens metasurface antenna and verification / J. W. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2023. – Vol. 71, № 8. – P. 6652–6666.
8. Collin, R. E. Foundations for microwave engineering / R. E. Collin. – 2nd ed. – New York : McGraw-Hill, 2001. – 944 p.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Поступила в редакцию 06.04.2026

Электрические фильтры с переходными частотными характеристиками

М.А. ЯНЦЕВИЧ¹, Г.А. ФИЛИППОВИЧ¹, А.С. КОНОПЛИЦКИЙ², В.О. ИСАЕВ²

В работе рассматривается решение задачи проектирования фильтров Баттерворта дробного порядка посредством использования модифицированной максимально-плоской аппроксимирующей функции передачи мощности с дополнительными вариативными параметрами. Конструкция предлагаемой аппроксимирующей функции позволяет формировать переходные частотные характеристики. Представлены результаты синтеза фильтров с частотной характеристикой дробного порядка, а также произведено сравнение аппроксимирующей функции Баттерворта со значением порядка 1,05, которая была получена известным методом оптимизации. Также рассмотрен вариант конструкции предлагаемой аппроксимирующей функции с комбинированием полиномов Баттерворта и Чебышева.

Ключевые слова: фильтр, аппроксимация, синтез, дробный порядок.

The paper considers the solution of the problem of designing fractional-order Butterworth filters by using a modified analytical Butterworth approximating function with additional variable parameters. The design of the proposed approximating function allows the formation of transient frequency characteristics. The results of the synthesis of filters with a fractional frequency response are presented, and the Butterworth approximating function with a value of the order of 1,05 is compared with the known result obtained by the well-known optimization method. A variant of the construction of the proposed approximating function with a combination of Butterworth and Chebyshev polynomials is also considered.

Keywords: filter, approximation, synthesis, fractional order.

Введение. Теория проектирования широкополосных частотно-избирательных цепей основана на использовании полиномиальных аппроксимирующих функций (АФ), описывающих желаемые частотные характеристики для электрических фильтров. Наличие аналитической записи АФ позволяет путем синтеза получить элементы фильтра, характеристики которого воспроизводят изначально заданную функцию коэффициента передачи мощности (рисунок 1).

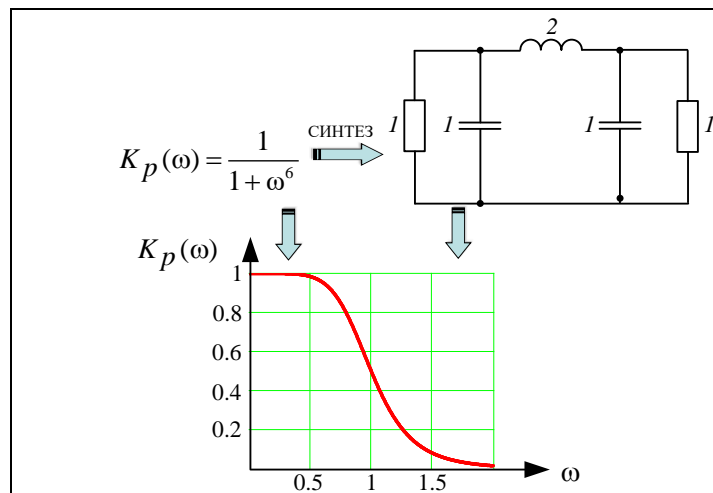


Рисунок 1 – Пример реализации фильтра Баттерворта 3-го порядка

Классический подход к синтезу фильтров обладает простым и понятным алгоритмом действий, а также поддается совершенствованию. Последнее подразумевает видоизменение (модификацию) известных АФ для удовлетворения условий конкретных задач. Однако для некоторых задач поиск рациональной функции оказывается затруднительным, и выходом в таких случаях является использование математического аппарата численных оптимизационных методов.

Предлагается рассмотреть одну из таких задач, суть которой заключается в нахождении частотной характеристики АФ Баттерворта дробного порядка (1) [1], [2], [3].

$$K_p(\omega) = \frac{K}{1 + \omega^{2(n+\alpha)}}, \quad (1)$$

где $K \in (0; 1]$ – коэффициент уровня передачи мощности; n – целое число, характеризующее порядок полинома; $\alpha \in (0, 0.01 \dots 1)$ – дробное число.

Функция Баттерворта максимально гладкая на частотах полосы пропускания и в сопоставлении с большинством классических АФ обладает более линейной фазо-частотной характеристикой. Это обстоятельство определяет приоритет в выборе фильтров Баттерворта при проектировании систем навигации, связи и управления, где существенно важна точность передаваемой информации. Увеличение порядка функции повышает избирательность частотной характеристики и вместе с тем ухудшает линейность фазовой составляющей. Компромисс этих характеристик можно обеспечить функцией дробного порядка (1). Проблема заключается в том, что функция с дробным порядком (1) не является рациональной и физически не реализуема. В публикации [1] предлагается двухэтапная процедура синтеза с использованием метода взвешенной суммы. Алгоритм позволяет найти физически реализуемую функцию, близкую по форме к частотной характеристике Баттерворта дробного порядка (1). Решение данной задачи в виде аналитической дробно-рациональной АФ, с одной стороны, значительно упростит процедуру синтеза, с другой стороны, даст полное объяснение природы формирования подобных частотных характеристик. Ниже предлагается аналитический способ формирования переходных частотных характеристик.

Переходные АФ. В качестве решения предлагается рассмотреть гибкую АФ (2), полученную на основе классической функции Баттерворта, в которой аппроксимирующая по Тейлору степенная функция ω^{2n} заменена суммой $\sum_{i=1}^n v_i \omega^{2i}$ с весовыми положительными коэффициентами v_i [4], [5].

$$K_p(\omega) = \frac{K}{1 + \varepsilon^2 \cdot \frac{v_1 \omega^2 + v_2 \omega^4 + \dots + v_n \omega^{2n}}{v_1 + v_2 + \dots + v_n}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon \in (0; 1]$ – коэффициент регулировки полосы согласования (для классической АФ Баттерворта $\varepsilon = 1$); $v_i \in (0; \infty]$ – варьируемые параметры.

Форма частотной характеристики АФ (2) плавно регулируется за счет варьирования ее коэффициентов v_i .

Так, при $v_n = 1$ и равными нулю остальными коэффициентами v_i мы имеем максимально-плоскую АФ, а при $v_1 = 1$ и $v_{i+1} = 0$, получаем минимальный порядок аппроксимации (минимально-плоскую АФ). Рассмотрим АФ (2) при следующих значениях её параметров $K = 1$, $\varepsilon = 1$, $v_1 = 1$, $v_3 = v_4 = \dots = v_n = 0$. Тогда выражение (2) можно записать следующим образом:

$$K_p(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{\omega^2 + v_2 \omega^4}{1 + v_2}}, \quad (3)$$

Как показано на рисунке 2, изменяя значения всего одного параметра v_2 в АФ (3), можно регулировать вид частотной характеристики между первым и вторым порядком функции Баттерворта.

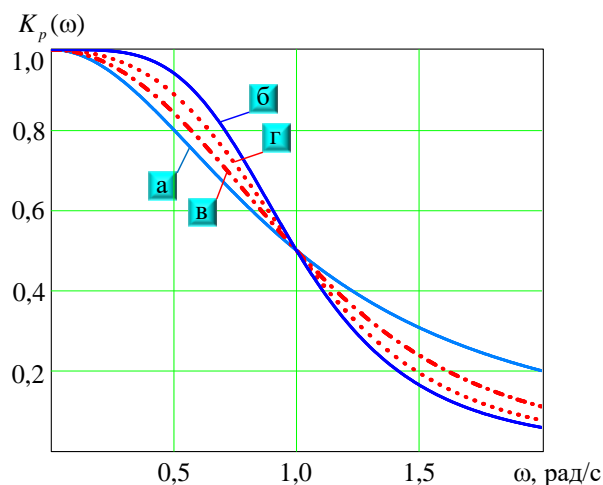


Рисунок 2 – Характеристика $K_p(\omega)$: а – АФ Баттерворта 1-го порядка; б – АФ Баттерворта 2-го порядка; в – АФ (3) при $\nu_2 = 0.5$; г – АФ (3) при $\nu_2 = 2$

В таблице 1 показаны схемы фильтров, полученных в результате синтеза из АФ Баттерворта и выражения (3).

Таблица 1 – Результат синтеза элементов фильтра из АФ Баттерворта и выражения (3)

Схемы фильтров полученных в результате синтеза из АФ Баттерворта	
$n = 1$	$n = 2$
Схемы фильтров полученных в результате синтеза из АФ (3)	
$\nu_2 = 0.5$	$\nu_2 = 2$

Приведенные выше схемы фильтров, синтезированные из АФ (3), обладают таким же количеством элементов, что и для фильтра Баттерворта 2-го порядка.

Алгоритм, представленный в работе [1], позволяет найти рациональную АФ, близкую по форме целевой функции (2). Представляет интерес сравнить вид АФ (3) и функции (4), полученной при помощи разработанного алгоритма в статье [1] для случая $n + \alpha = 1.05$.

$$K_p(-s^2) = \left| \frac{0.0354s^2 + 12.7050s + 167.2891}{s^3 + 70.7800s^2 + 236.1953s + 165.1961} \right|^2. \quad (4)$$

Для обеспечения соответствующего вида частотной характеристики в АФ (3) выбрано значение параметра $\nu_2 = 0.01$. На рисунке (3) представлено сопоставление частотных характеристик передачи мощности.

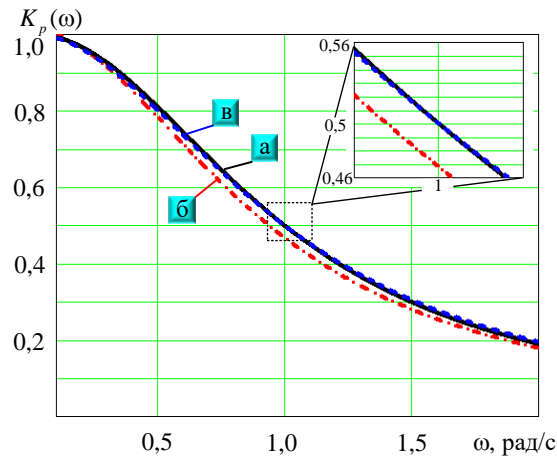


Рисунок 3 – Характеристика $K_p(\omega)$: а – АФ (1) при $n + \alpha = 1.05$; б – АФ (4); в – АФ (3) при $v_2 = 0.01$

Алгоритм поиска функций дробного порядка [1] принципиально обусловлен выбором метода оптимизации, а, как известно, увеличение числа решаемых уравнений (что означает увеличение порядка функции) может приводить к нарастанию ошибок в вычислениях, тем самым ухудшая качество аппроксимации. Следует отметить, что предлагаемый вариант аппроксимации (3) в большей степени соответствует заданной целевой функции. Также АФ (3) в отличие от (4) сохраняет условие нормировки по частоте (при $\omega_c = 1$ $K_p(\omega) = 0,5$).

Используя описанный выше подход можно получить другие варианты переходных аппроксимаций. Например, выражение (5) позволяет осуществлять переход между полиномами Баттерворта и Чебышева 3-го порядка.

$$K_p(\omega) = \frac{K}{1 + \varepsilon^2 \frac{v_1 \omega^6 + v_2 (4\omega^3 - 3\omega)^2}{v_1 + v_2}} \quad (5)$$

На рисунке (4) показана АФ (5) совместно с АФ Баттерворта и Чебышева 3-го порядка с заданными параметрами $K = 1$ и $\varepsilon = 0,349$ (0,5 дБ) при различных значениях параметра v_2 .

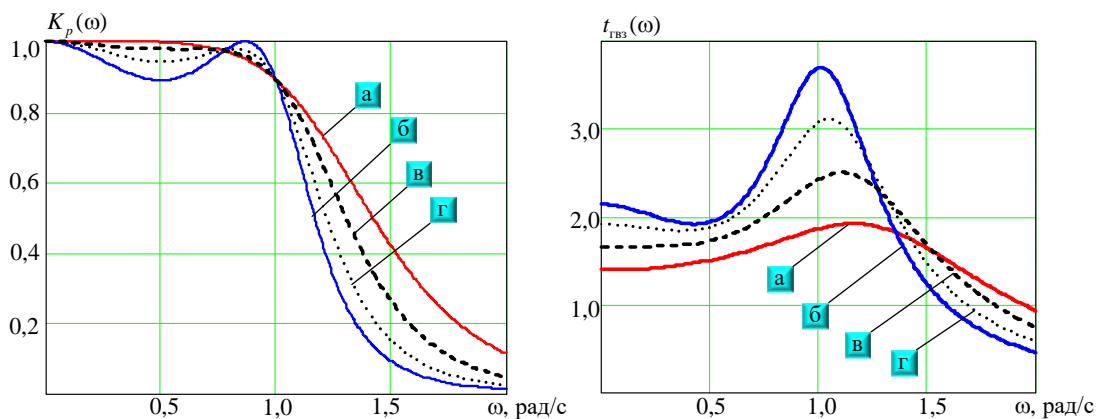


Рисунок 4 – Характеристики $K_p(\omega)$, $t_{гбв}(\omega)$: а – АФ Баттерворта 3-го порядка; б – АФ Чебышева 3-го порядка; в – АФ (5) при $v_1 = 1$; $v_2 = 0,2$; г – АФ (5) при $v_1 = 1$; $v_2 = 1$

Показанная зависимость группового времени запаздывания $t_{гбв}(\omega)$ на рисунке 4 также отражает гибкие свойства АФ (5). Ниже представлены схемы фильтров, которые получены после процедуры синтеза из АФ (5).

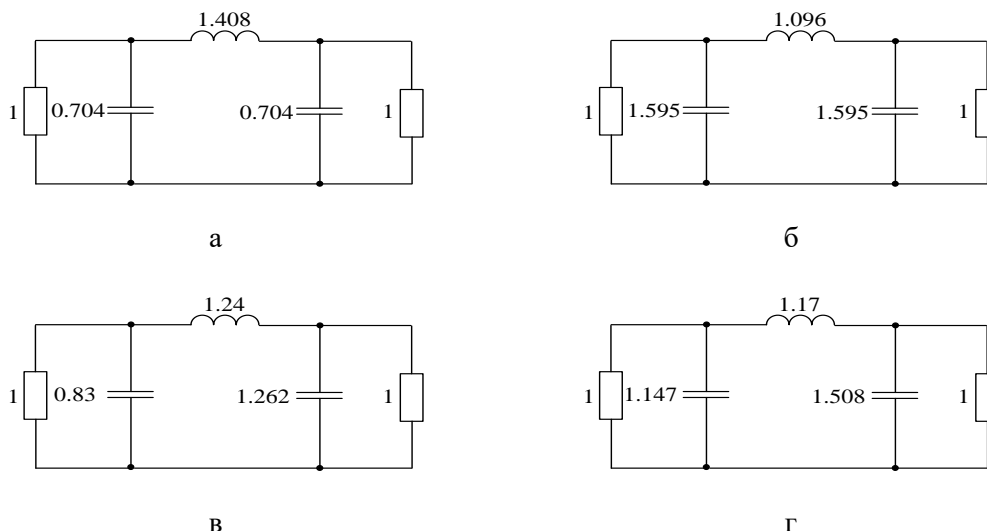


Рисунок 5 – Схемы фильтров: а – фильтр с характеристикой на рисунке 4(а); б – фильтр с характеристикой на рисунке 4(б); в – фильтр с характеристикой на рисунке 4(в); г – фильтр с характеристикой на рисунке 4(г)

Заключение. Такой подход к аппроксимации позволяет конструировать АФ с дополнительными вариативными параметрами и контролируемым сочетанием свойств выбранных ЧХ. АФ (2) и производные от неё функции является простым эффективным решением, не требующим применения сложного математического аппарата. Представленные результаты исследований могут быть полезны при решении прикладных задач, связанных с поиском оптимальных переходных характеристик и зависимостей в области электродинамики, биоинженерии, экономики, генетики, электроники.

Литература

1. Mahata, S. Optimal approximation of fractional-order butterworth filter based on weighted sum of classical butterworth filters / S. Mahata, N. Herencsar, D. Kubanek // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 81097–81114.
2. Ali, A. S. Fractional order butterworth filter : Active and passive realizations / A. S. Ali, A. G. Radwan, A. M. Soliman // *IEEE J. on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 346–354.
3. Mahata S. Optimal fractional-order highpass butterworth magnitude characteristics realization using current-mode filter / S. Mahata, R. Kar, D. Mandal // *AEU – Intern. J. of Electronics and Communications*. – 2019. – Vol. 102. – P. 78–89.
4. Янцевич, М. А. Методика синтеза широкополосных согласующих устройств с использованием ограниченно-плоских аппроксимирующих функций / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // *Известия ГГУ им. Ф. Скорины*. – 2021. – № 6 (129). – С. 154–158.
5. Янцевич, М. А. Гибкие аппроксимирующие функции для широкополосного согласования / Г. А. Филиппович, М. А. Янцевич // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2022. – № 2. – С. 6–15.

¹Военная академия Республики Беларусь

²Оперативно-аналитический центр
при Президенте Республики Беларусь

Simulation of the thermomechanical behavior of 30XГСН2А steel during pulsed laser cladding of wire materials

YU.V. NIKITYUK, G.A. BAEVICH, A.V. MAKSIMENKO, A.N. SERDYUKOV

This study focuses on the numerical simulation of thermomechanical processes occurring during pulsed laser cladding of wire filler materials onto 30XГСН2А steel. The relevance of this study stems from the need to minimize defects in the clad zone and reduce residual stresses. A three-dimensional finite element model was developed using the Ansys Mechanical APDL software package to analyze the non-stationary temperature fields and the stress-strain state. The model accounts for the temperature dependence of the material's thermophysical and mechanical properties, as well as its plastic behavior described by a bilinear isotropic hardening model (BISO). The cladding process is simulated using the sequential activation of elements representing the deposited bead, accompanied by the application of a laser heat flux. The martensitic transformation of austenite upon cooling is described with the Koistinen-Marburger equation, which enables the description of additional strains from phase transitions. The developed model facilitates the prediction of residual stress distribution and can optimize technological parameters in order to minimize defects during pulsed laser cladding of 30XГСН2А steel with wire filler material.

Keywords: laser cladding, finite element modeling, thermomechanical behavior, residual stresses, Ansys.

Работа посвящена численному моделированию термомеханических процессов, возникающих при импульсной лазерной наплавке проволочных присадочных материалов на сталь 30XГСН2А. Актуальность работы обусловлена необходимостью минимизации дефектов в зоне наплавки и остаточных напряжений. Для анализа нестационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния разработана трехмерная конечно-элементная модель в программном комплексе Ansys Mechanical APDL. Модель учитывает температурную зависимость теплофизических и механических свойств материала, а также пластическое поведение по билинейной модели изотропного упрочнения (BISO). Процесс наплавки моделируется последовательной активацией элементов, соответствующих наплавляемому валлику, с приложением теплового потока от лазера. В работе учтено мартенситное превращение аустенита при охлаждении осуществляется с помощью уравнения Койстинена-Марбургера, что позволяет описать дополнительные деформации от фазовых переходов. Разработанная модель позволяет прогнозировать распределение остаточных напряжений и может быть использована для оптимизации технологических режимов с целью минимизации дефектов при импульсной лазерной наплавке стали 30XГСН2А присадкой в виде проволоки.

Ключевые слова: лазерная наплавка, конечно-элементное моделирование, термомеханическое поведение, остаточные напряжения, Ansys.

Introduction. Currently, various methods are employed to achieve the desired surface properties of materials, including electron beam treatment, ion treatment, flame treatment, laser treatment, etc. When processing machine-building components, laser technologies are particularly effective, distinguished by their productivity, flexibility, and the ability to process parts of virtually any size and geometry. The implementation of laser cladding is highly efficient in attaining the desired properties of the surface layers of products. This method is characterized by high adhesion strength between the deposited layer and the substrate, as well as a minimal heat-affected zone [1]–[2]. However, the use of laser cladding is occasionally associated with crack formation. This is due to the fact that the laser cladding process of steels involves complex thermomechanical phenomena that lead to the formation of residual stresses. The mechanism of their occurrence is determined by the incompatibility of inelastic deformations, primarily thermal shrinkage strains during cooling, structural shrinkage resulting from phase transformations, and the differing deformation history of various regions of the material [3]–[5].

To address this issue, it is advisable to use pulsed laser radiation and wire filler materials. Pulsed laser cladding, through the variation of processing parameters, enables precise control over the heating and cooling rates of the deposited metal and the substrate. This consequently provides the opportunity to reduce residual deformations and stresses [2]–[3].

Finite element modeling of the pulsed laser cladding process using wire filler materials is an important step for optimizing the corresponding technological parameters that ensure the minimization of defects and residual stresses. Studies [6]–[10] present finite element modeling of the wire material melting process performed in the Marc, Mentat, and Ansys software packages, considering the thermal and deformation processes occurring in the samples.

Previously, the authors in [6]–[7] performed optimization of pulsed laser cladding of 30XГCH2A structural steel with wire filler material using a genetic algorithm and neural network modeling. In that surrogate model of pulsed laser cladding of steel, only temperature values in the processing zone were used as responses, neglecting the thermomechanical behavior of the steel. This research examines the characteristics of thermomechanical modeling during the pulsed laser cladding process of 30XГCH2A steel with wire filler material using the element birth technique in the Ansys software.

Finite element modeling of pulsed laser cladding. A three-dimensional finite element model was developed using the Ansys Mechanical APDL software package to explore the thermomechanical processes involved in the pulsed laser cladding of wire materials. The model is designed to calculate non-stationary temperature fields, determine changes in the stress-strain state, and evaluate residual stresses within the «substrate – deposited layer» system. The base material and the filler material consist of 30XГCH2A structural steel. The simulation incorporated the temperature dependence of thermal conductivity, specific heat capacity, density, elastic modulus, Poisson's ratio, and the coefficient of thermal expansion [3], [11]. Plastic behavior was described using a bilinear isotropic hardening model (BISO) with temperature-dependent yield strength and hardening modulus (see Figure 1 in [5]).

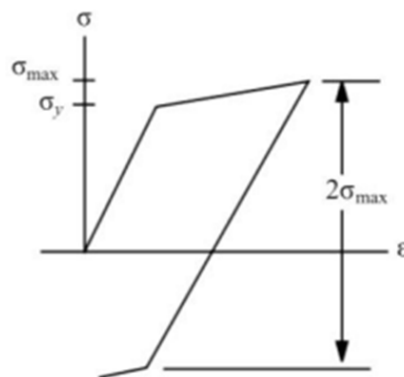


Figure 1 – $\sigma - \varepsilon$ diagram for the bilinear isotropic hardening model (BISO)

The computational model considers the formation of a single deposited bead on the surface of a metal substrate (see Figure 2).

The model geometry comprises the substrate and the deposited layer: a metal substrate in the form of a rectangular parallelepiped with dimensions of $8 \times 8 \times 3$ mm and a deposited layer with dimensions of $3 \times 0,5 \times 0,2$ mm. To ensure the required accuracy while reducing computational costs, the finite element mesh was refined in the cladding region (see Figure 3). The element size in the deposited layer and the adjacent part of the substrate was 0,05 mm. Twenty-node SOLID90 elements were used for thermal analysis, whereas SOLID186 elements were utilized for mechanical analysis. The total number of elements was 17,131.

The initial temperature of the sample and the ambient environment was assumed to be 20° C. Heat transfer with the surroundings via convection was considered on the external surfaces of the computational domain.

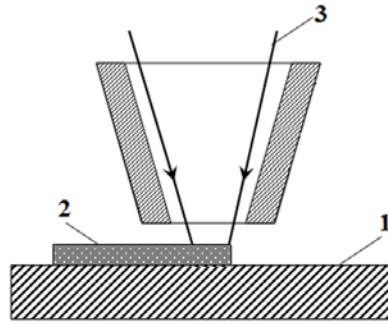


Figure 2 – Arrangement of the base metal and filler material relative to the laser beam: 1 – base metal; 2 – filler material; 3 – laser beam

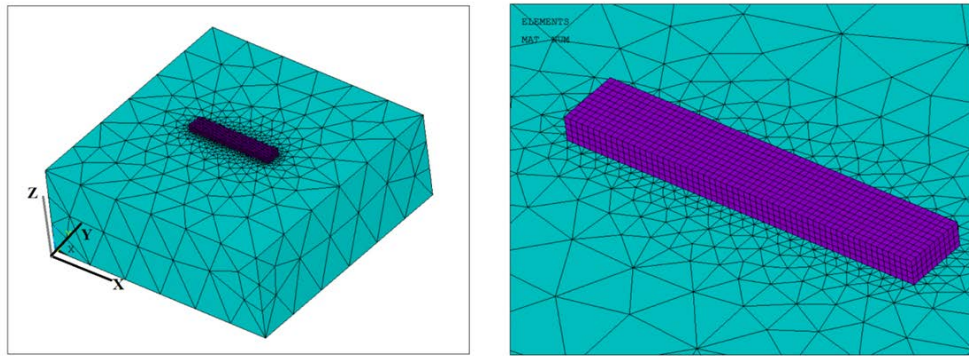


Figure 3 – Finite element mesh of the model

The parameters for the pulsed laser radiation utilized in the cladding simulation were as follows: pulse energy $E = 5$ J, pulse duration $\tau = 5$ ms, repetition rate $f = 5$ Hz, and laser spot radius $R = 0,25$ mm. The spot overlap was 50 %, which corresponds to a laser translation step between pulses of $\Delta x = 0,25$ mm. The absorbed laser power was specified as a surface heat flux with a uniform distribution over the spot.

The problem was divided into two uncoupled problems: transient heat conduction and quasi-static thermomechanics of the stress-strain state. This approach aligns with the methodology described in [4]–[5] and allows for a significant reduction in computational costs.

Numerical simulation of pulsed laser cladding of wire materials onto 30KhGSA steel was implemented using the element «birth» and «death» technique. With this technique, all elements corresponding to the as-yet-unclad material are physically present in the finite element model from the very beginning of the calculation, but are excluded from the solution by assigning them degraded thermophysical and mechanical properties. This approach avoids mesh reconstruction and renumbering of nodes throughout the solution procedure. In practice, to ensure numerical stability, values several orders of magnitude lower than the original ones are used rather than strictly zero values. Upon element activation, their properties are restored to their original values. An important feature is that the activated elements inherit the existing deformed state of the structure. Thus, the initial strains for the newly activated material are assumed to be equal to the strains corresponding to the moment of its emergence, which is inherently considered in the constitutive relations.

The beginning of the simulation involved the deactivation of all elements corresponding to the deposited layer. This was followed by a loop over the heating steps representing successive laser positions. The number of heating steps was determined by the cladding length and the translation step.

For each position of the laser beam center, the following steps were performed:

- activation of the cladding elements whose location coincided with the laser beam irradiation zone;
- application of a heat flux to the nodes on the top surface of the active elements within the laser beam irradiation zone;
- solution of the heat conduction problem over a time interval equal to the pulse duration τ ;
- removal of the heat flux and solution of the heat conduction problem over the pause interval $1/f - \tau = 0,195$ s;

- saving the current time instant and the coordinates of the laser beam center for subsequent mechanical analysis;
- upon completing the cladding cycle, a sample cooling stage was implemented.

After obtaining the complete thermal history, we calculated the stress-strain state. The element type was switched to the structural SOLID186. At this stage, element activation was redefined in the same sequence as in the thermal analysis. For each time instant, the corresponding temperature field was derived from the thermal analysis results file and applied as a nodal load. Subsequently, the stress-strain state of the material was computed. The displacement boundary conditions simulated rigid fixation of the bottom surface of the substrate. The mechanical properties of deactivated elements were modified in a manner similar to the thermal analysis. The activation of elements was accompanied by the restoration of their original properties, with the initial strains assumed to be equal to the strains accumulated in the structure by the time of activation.

In pulsed laser cladding of steels, the formation of residual stresses is determined not only by the evolution of temperature fields but also by phase transformations occurring during the cooling of the molten metal. The high cooling rates characteristic of laser technologies lead to the formation of a predominantly martensitic structure. Accordingly, the developed finite element model accounted for the martensitic transformation of austenite upon cooling. The martensite fraction was calculated using the Koistinen-Marburger equation [12]. The austenite-to-martensite transformation is accompanied by an increase in the volume of the crystal lattice. This results in an additional phase transformation strain, which influences the formation of residual stresses during pulsed laser cladding of 30XГCH2A steel. The phase transformation strain was introduced into the finite element model as an additional plastic strain.

The results of numerical simulation regarding the thermomechanical behavior of 30XГCH2A steel during pulsed laser cladding are illustrated in Figures 4–6.

Figure 4 shows the distribution of temperature and von Mises equivalent stresses within the processed plate at the moment of completion of the sixth laser pulse. At this moment, a localized zone of intense heating is generated in the region of laser irradiation. The maximum temperature values are observed directly in the laser irradiation zone. Moving away from the irradiation zone, the temperature decreases rapidly. The high heterogeneity of the temperature field induces an intense stress state in the material. The analysis of the von Mises equivalent stress distribution reveals that the regions of the highest stress intensity are also localized in the direct laser irradiation zone and in the adjacent area of the substrate.

Figure 5 depicts the temperature and von Mises equivalent stress distribution after the completion of the pause between the sixth and subsequent laser pulses. During the pause, the heated metal cools down, which is accompanied by a decrease in maximum temperatures and a more uniform temperature distribution within the sample volume. The evolution of the temperature field is accompanied by a redistribution of the stress state. The von Mises equivalent stress distribution reveals a shift in the regions of the highest stress intensity and their partial reduction compared to the moment of laser pulse action. The main areas of increased stress intensity remain in the region of the deposited layer.

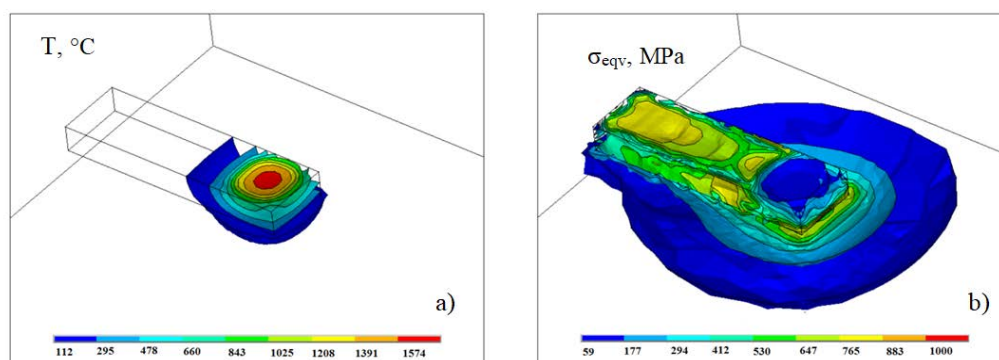


Figure 4 – Temperature and von Mises equivalent stress distribution within the processed plate at the moment of completion of the sixth laser pulse

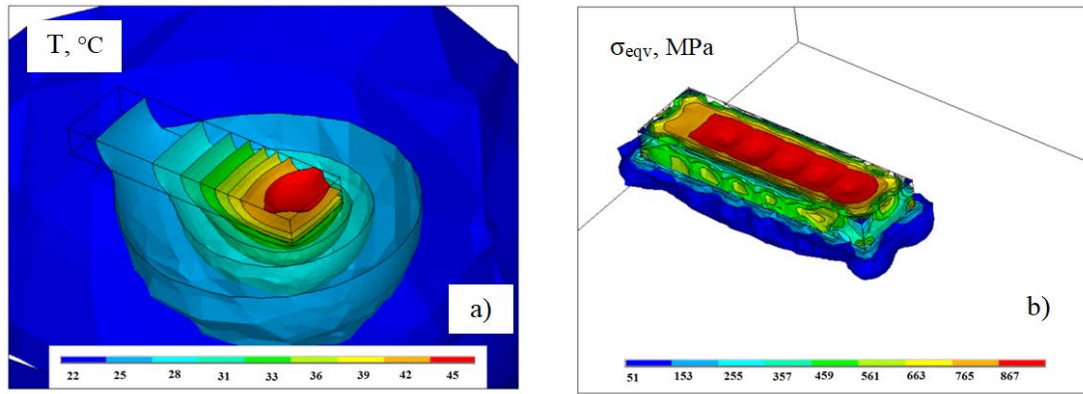


Figure 5 – Temperature and von Mises equivalent stress distribution within the processed plate at the moment of completion of the pause after the sixth laser pulse

Following the cladding process and cooling of the sample to ambient temperature, a residual stress state is established, the distribution of which is illustrated in Figure 6. The illustration presents the distributions of von Mises equivalent stresses alongside the stress components σ_x , σ_y , and σ_z within the volume of the processed plate.

The analysis of the von Mises equivalent stress distribution reveals that the regions of the highest stress intensity are concentrated predominantly in the deposited layer. This phenomenon is explained by the observation that in these regions the material undergoes the most intense heating and cooling cycles, accompanied by significant temperature gradients and plastic deformations. The distribution of the stress components σ_x , σ_y , and σ_z allows for a more detailed assessment of the material's stress state. The most significant stress values are observed near the cladding zone, where the most intense thermomechanical processes occur.

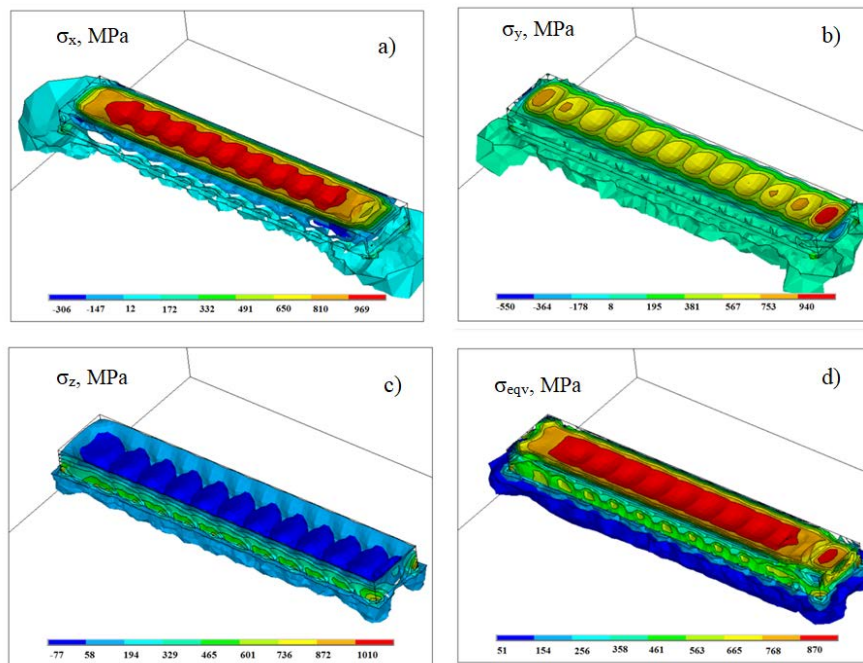


Figure 6 – Residual stress distribution in the processed plate after cladding and cooling to 20° C

Conclusion. The authors have developed a finite element model for pulsed laser cladding of 30XГCH2A steel, incorporating thermal, mechanical, and structural changes in the material. The model enables simulation of the thermomechanical behavior of the substrate–deposited layer system and prediction of residual stress formation. The key factors determining the stress-strain state are the localization and cyclicity of heat input, together with phase transformations during cooling. Ac-

counting for the martensitic transformation modifies the residual stress distribution. The regions of maximum stresses are concentrated in the deposited layer and the adjacent heat-affected zone, which correlates with the experimental data. The proposed modeling approach provides a mechanism for optimizing processing parameters to minimize residual stresses and enhance product quality.

References

1. Grigoryants, A. G. Technological processes of laser processing / A. G. Grigoryants, I. N. Shiganov, A. I. Misyurov. – M. : MGTU Bauman Publ., 2006. – 664 p. (in Russian).
2. Devoyno, O. G. Technology of formation of wear-resistant coatings on the iron base by laser processing methods / O. G. Devoyno, M. A. Kardapolova, A. S. Kalinichenko [et al.]. – Minsk : BNTU, 2020. – 280 p. (in Russian).
3. Maksimenka, A. V. Technology of restoration of details surfaces of aviation technics pulsing laser weld deposit / A. V. Maksimenka. – Minsk, 2011. – 27 p. (in Russian).
4. Smetannikov, O. Yu. Simulation in ANSYS of the thermomechanical behavior of a product during 3D wire cladding / O. Yu. Smetannikov, D. N. Trushnikov, P. V. Maksimov [et al.] // Vestnik Vestnik PSTU. – 2017. – № 4. – P. 154–172. (in Russian).
5. Smetannikov, O. Yu. Investigation of the influence of 3D wire cladding process parameters on the formation of residual strains / O. Yu. Smetannikov, P. V. Maksimov, D. N. Trushnikov [et al.] // Vestnik PSTU. – 2019. – № 2. – P. 181–194. (in Russian).
6. Nikityuk, Yu. V. Optimization of parameters of pulsed laser cladding of 30XГCH2A steel using a genetic algorithm / Yu. V. Nikityuk, G. A. Bayevich, A. V. Aushev [et al.] // Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel. – 2024. – № 1 (96). – P. 63–71. (in Russian).
7. Nikitjuk Yu. Characterization of laser cladding of steel 30XГCH2A by combining artificial neural networks and finite element method // Yu. Nikityuk, G. Bayevich, V. Myshkovets [et al.] // Research and education: traditions and innovations. – 2022. – Vol. 422. – P. 273–279.
8. Agelet de Saracibar, C. Shaped metal deposition processes / C. Agelet de Saracibar, A. Lundbäck, M. Chiumenti [et al.] // Encyclopedia of Thermal Stresses. – Dordrecht : Springer, 2014. – P. 4346–4355.
9. Lundbäck, A. Modelling of metal deposition / A. Lundbäck // Finite Elements in Analysis and Design. – 2011. – Vol. 47. – P. 1169–1177.
10. Suárez Díaz, A. Thermomechanical and metallurgical modelling of laser hardening and laser cladding processes / A. Suárez Díaz. – Coruña : Universidade da Coruña, 2011. – 214 p.
11. Zinoviev, V. E. Thermophysical properties of metals at high temperatures: handbook / V. E. Zinoviev. – M. : Metalurgia Publ., 1989. – 384 p. (in Russian).
12. Xiong, L. Numerical simulation of residual stress for laser welding of ti-6Al-4V alloy considering solid-state phase transformation / L. Xiong, G. Mi, C. Wang [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol. 28, № 6. – P. 3349–3360.

Особенности формирования морфологии пленок MoSe_x , полученных двухэтапным методом

А.В. СТАНЧИК¹, В.Ф. ГРЕМЕНОК¹, П.А. ГРИГАЛЬ¹, А.В. ТРУХАНОВ¹, К.П. БУСКИС¹,
Е.С. ДАШКЕВИЧ¹, Д.В. ЖИГУЛИН², СЯОСУ ЖАО³

В работе представлены результаты исследования пленок MoSe_x , полученных с помощью двухэтапного метода синтеза, который включает магнетронное напыление слоя Мо и его последующую селенизацию. Выявлено влияние параметров селенизации и магнетронного напыления, в том числе толщины слоя Мо, на элементный состав и морфологию пленок MoSe_x . Показано, что формирование пленок MoSe_x зависит от температуры селенизации, а также определяется параметрами напыления Мо.
Ключевые слова: пленки, MoSe_2 , дихалькогениды переходных металлов, морфология, магнетронное напыление, селенизация.

This paper presents the results of a study of MoSe_x films obtained using a two-step synthesis method involving magnetron sputtering of a Mo layer and its subsequent selenization. The influence of selenization and magnetron sputtering parameters, including the Mo layer thickness, on the elemental composition and morphology of MoSe_x films is revealed. It is shown that the nature of MoSe_x film formation depends on the selenization temperature and is also determined by the Mo sputtering parameters.

Keywords: films, MoSe_2 , transition metal dichalcogenides, morphology, magnetron sputtering, selenization.

Введение. Диселенид молибдена (MoSe_2) относится к классу дихалькогенидов переходных металлов и является перспективным материалом для современной нано- и оптоэлектроники [1]–[3]. Благодаря уникальной слоистой структуре и переходу от непрямой к прямой запрещенной зоне при уменьшении толщины до монослоя, MoSe_2 находит применение в производстве высокоэффективных фотодетекторов, транзисторов и электрокатализаторов для генерации водорода [1], [4]–[7]. При этом интеркаляция собственными атомами низкоразмерных дихалькогенидов переходных металлов ($\text{M}_x\text{-MX}_2$) является эффективным методом настройки их физических свойств: электронной структуры, проводимости и магнитного упорядочения, что открывает широкие возможности для создания управляемых многофункциональных материалов с заданными характеристиками для высокопроизводительных электронных устройств [8]–[10]. Однако фундаментальной проблемой получения MoSe_2 (включая самоинтеркалированные фазы) остается достижение воспроизводимого управления стехиометрией и фазовой однородностью. В частности, неконтролируемая кластеризация интеркалянта в межслойном пространстве MoSe_2 препятствует направленной настройке его свойств [10]–[13].

Целью работы является исследование элементного состава и морфологии пленок MoSe_x в зависимости от параметров их получения на кремниевых подложках. Преимуществом выбранного двухэтапного метода синтеза пленок MoSe_x , включающего магнетронное напыление Мо и последующую его селенизацию, является возможность контроля толщины и морфологии исходного слоя Мо, а также независимая оптимизация параметров термической обработки для достижения заданной стехиометрии пленок.

Методика эксперимента. Пленки MoSe_x получены двухэтапным методом на подложках из монокристаллического кремния. На первом этапе методом магнетронного распыления на установке Ortus-700 осуществлялось напыление металлического слоя Мо на предварительно очищенные подложки. Процесс выполнялся в высокочастотном (ВЧ) режиме при комнатной температуре. В качестве источника Мо использовалась планарная мишень молибдена диаметром 101,6 мм и толщиной 6 мм. Слои Мо были получены толщиной 5 и 8 нм при трех различных режимах напыления. Во всех случаях базовое давление составляло $\sim 3 \times 10^{-3}$ Па, а рабочее давление изменялось в диапазоне $(1-3) \times 10^{-1}$ Па в зависимости от расхода рабочего газа (Ar). Мощность распыления составляла 120, 95 и 70 Вт, а расход аргона – 60, 80 и

100 см³/мин, соответственно. Толщина напыляемого слоя контролировалась с помощью кварцевого измерителя, установленного внутри вакуумной камеры.

На втором этапе осуществлялся синтез пленок MoSe_x путем отжига полученных слоев Mo в активной атмосфере Se в вакууме (селенизация). Термическая обработка проводилась в трубчатой кварцевой печи СУ-О1200, оснащенной механическим и молекулярным насосами. Образцы помещались в графитовый контейнер с порошкообразным селеном (~15 мг), который выступал в качестве источника халькогена. Предварительно камера печи откачивалась до $\sim 1 \times 10^{-2}$ Па, а затем осуществлялся напуск аргона. Селенизация проводилась при различных температурах и времени выдержки. Первая серия образцов MoSe_x была получена при 480 °С в течение 20 мин; скорость нагрева до 250 °С составляла 7 °С/мин, а затем – 5 °С/мин. Вторая серия образцов была получена при 750 °С в течение 40 мин; скорость нагрева до 250 °С составляла 7 °С/мин, а затем – 8 °С/мин. После термообработки образцов происходило самопроизвольное охлаждение печи до комнатной температуры.

Данные элементного состава и микрофотографии были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа «S-4800» (Hitachi, Япония), оснащенного энергодисперсионной приставкой.

Результаты и их обсуждение. В результате термообработки в парах селена слоев Mo при температуре 480 °С в течение 20 мин формирование пленок MoSe_x не наблюдается. Данные рентгеноспектрального микроанализа (РСМ) не выявили наличия Se в составе отожженных образцов в пределах чувствительности метода. На рисунке 1 представлена типичная микрофотография с элементным картированием образцов после термообработки (на примере слоя Mo с технологической толщиной 8 нм, осажденного при 95 Вт и 80 см³/мин). На поверхности подложки сформированы наносферические и крупные пластинчатые частицы Mo, выступающие из плоскости подложки. Микрофотография демонстрирует хаотичное распределение частиц обоих типов по поверхности подложки без ярко выраженной преимущественной ориентации. Отсутствие Se в составе образцов позволяет предположить, что выбранные режимы термообработки не способствуют химическому взаимодействию компонентов, приводя к испарению Se и росту зерен Mo. Так, в [14] показано, что в пленках Mo_xSe_y ($x = 0 \approx 10$, $y = 0 \approx 2$), полученных ВЧ-магнетронным напылением на кремниевых подложках, отжиг выше температуры плавления Se приводит к его испарению и сегрегации Mo на поверхности подложки. В то же время в [15] установлено, что повышение температуры селенизации от 300 до 580 °С пленок Mo, полученных магнетронным напылением в режиме постоянного тока, способствует увеличению количества образовавшегося MoSe₂ и уменьшению количества чистого Mo.

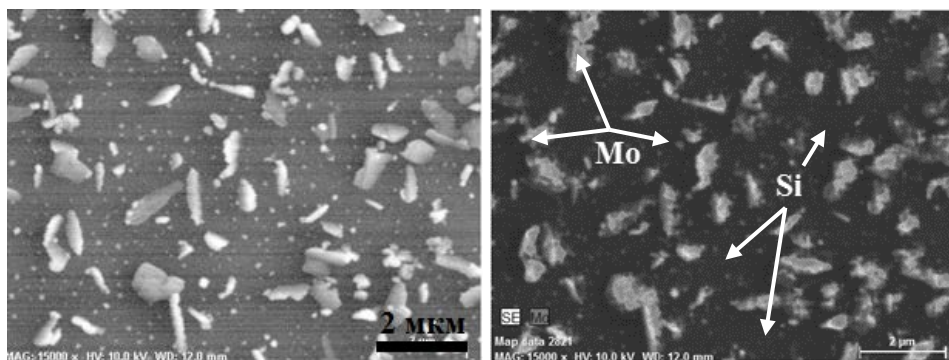


Рисунок 1 – Типичная микрофотография с картой распределения элементов для образцов слоя Mo (серый или черный фон – Si, светлые точки и области – Mo) после селенизации при 480 °С в течение 20 мин.

Технологическая толщина слоя Mo – 8 нм, параметры магнетронного напыления: мощность – 95 Вт, расход Ar – 80 см³/мин

Микрофотографии, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и представленные на рисунке 2, отчетливо демонстрируют влияние параметров магнетронного напыления Mo на формирование дальнейшей морфологии образцов после их отжига при 480 °С, несмотря на отсутствие фазы диселенида молибдена. Так, с уменьшением

мощности от 120 до 70 Вт и увеличением расхода рабочего газа от 60 до 100 $\text{см}^3/\text{мин}$ происходит образование более мелких частиц с большей плотностью их распределения по поверхности подложки. Такая закономерность связана со спецификой магнетронного напыления и объясняется снижением энергии частиц, осаждаемых на подложку, в том числе из-за частых столкновений с молекулами газа и их быстрой термализации [15]–[18]. Это определило различия в морфологии образцов после их высокотемпературной обработки.

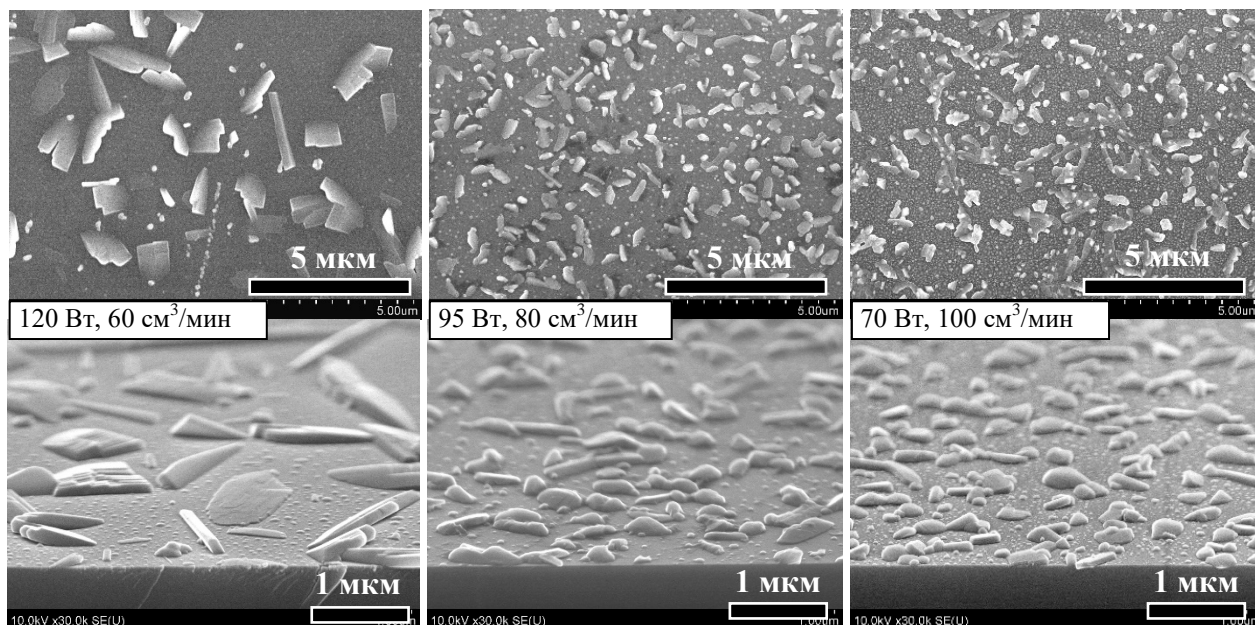


Рисунок 2 – Микрофотографии образцов слоя Mo на кремниевых подложках после селенизации при 480 °С в течение 20 мин в зависимости от параметров магнетронного напыления молибдена (указаны на рисунке); технологическая толщина исходного слоя Mo – 8 нм

На СЭМ-изображении под углом для образца (рисунок 2), полученного при наибольшей мощности магнетронного напыления (120 Вт) и минимальном расходе аргона (60 $\text{см}^3/\text{мин}$), наблюдаются крупные ограненные частицы в форме продолговатых пластинок. Их длина достигает полтора микрона, а ширина варьируется от 200 до 700 нм в плоскости подложки. Формирование такой морфологии обусловлено высокой мощностью распыления и низким расходом аргона при осаждении Mo. Данные параметры осаждения способствовали направленному потоку распыляемых частиц Mo с высокой энергией к подложке, что привело к образованию крупных зародышей с высокой поверхностной подвижностью, а последующая термообработка инициировала их интенсивный рост и дальнейшую агломерацию. Увеличение расхода Ar до 80 $\text{см}^3/\text{мин}$ при одновременном уменьшении мощности до 95 Вт вызвало снижение энергии осаждаемых частиц Mo и их частичное рассеивание. На поверхности подложки образовались в основном мелкие зародыши с невысокой поверхностной подвижностью, что в результате отжига привело к образованию как наноразмерных зерен, так и более крупных частиц округлой и продолговатой формы. Размеры крупных частиц меньше, чем в предыдущем случае. Дальнейшее повышение расхода Ar до 100 $\text{см}^3/\text{мин}$ при уменьшении мощности до 70 Вт вызвало значительное увеличение частоты столкновений частиц Mo с атомами газа, что привело к потере их энергии на фоне низкой мощности распыления. При таких параметрах осаждения после селенизации сформировалась структура с более высокой плотностью наноразмерных зерен и крупных частиц по сравнению с предыдущими режимами. Размеры образований варьируются от нескольких единиц до нескольких сотен нанометров. Полученные результаты показывают, что варьирование параметров магнетронного распыления позволяет эффективно управлять размером и плотностью частиц Mo, образующихся в процессе последующей термической обработки.

В результате селенизации наноразмерных слоев Мо при более высокой температуре 750 °С в течение 40 мин происходит формирование пленок MoSe_x . Все синтезированные образцы характеризуются макроскопической однородностью и имеют светло-золотистый цвет независимо от параметров магнетронного распыления и толщины исходного слоя молибдена. Данные РСМ-анализа подтверждают наличие Мо и Se в составе всех синтезированных пленок (таблица 1). При этом образцы, полученные на основе слоя Мо с технологической толщиной 8 нм, характеризуются нестехиометрическим соотношением $[\text{Se}]/[\text{Mo}]$, в то время как образцы с исходной толщиной 5 нм имеют стехиометрический или близкий к нему состав. Полученные результаты свидетельствуют о том, что заданные параметры термообработки обеспечивают полную селенизацию слоя Мо при наименьшей его толщине. При толщине 8 нм диффузионные процессы не успевают завершиться по всему объему слоя Мо, оставляя образец нестехиометричным. Следует отметить, что MoSe_2 может кристаллизоваться и при нестехиометрических соотношениях компонентов; в этом случае слой MoSe_2 формируется на поверхности пленок, а нижележащий Мо остается в непрореагировавшем состоянии [15].

Таблица 1 – Элементный состав пленок MoSe_x , полученных на кремниевой подложке при температуре селенизации 750 °С в течение 40 мин, в зависимости от параметров магнетронного напыления Мо

Параметры напыления слоя Мо			Элементный состав, ат.%		Атомное соотношение
Мощность, Вт	Расход Ar, см ³ /мин	Технологическая толщина слоя Мо, нм	Mo	Se	$[\text{Se}]/[\text{Mo}]$
120	60	8	53,53	46,47	0,88
95	80		54,30	45,70	0,84
70	100		51,03	48,97	0,95
120	60	5	35,87	64,13	1,79
70	100		32,43	67,57	2,08

Значение соотношения $[\text{Se}]/[\text{Mo}]$ сначала уменьшается, а затем возрастает с понижением мощности распыления и ростом расхода Ar при магнетронном напылении Мо. Наблюдаемый нелинейный характер изменения состава может указывать на сложную зависимость процессов диффузии Se от исходной морфологии, в частности, размера и плотности упаковки частиц Мо. В обоих случаях образцы, полученные при меньшей мощности распыления (70 Вт) и высоком расходе Ar (100 см³/мин), характеризовались наибольшим содержанием Se; при этом во втором случае состав образца имел стехиометрическое соотношение. Это, вероятно, обусловлено мелкозернистой структурой исходного слоя Мо с большим количеством межзеренных границ, что обеспечило на порядок более быструю диффузию, чем объемная [15], [19]. Полученные результаты согласуются с работой [15], где установлено, что степень образования MoSe_2 снижается с 13,4 % до 6,9 % при увеличении мощности распыления исходного слоя Мо от 100 Вт до 250 Вт.

Все пленки MoSe_x , несмотря на их неоднородную структуру, характеризовались равномерным распределением составных элементов по поверхности подложки (рисунок 3). Исключением является образец MoSe_x , полученный при параметрах магнетронного напыления Мо: 70 Вт и 100 см³/мин, где наблюдается единичный локальный участок, обогащенный селеном. Во всех случаях сформирована схожая структура поверхности пленок MoSe_x (рисунок 3), которая представлена совокупностью наноразмерных и крупных пластинчатых частиц. Независимо от параметров напыления и толщины исходного слоя Мо наноразмерные частицы образуют сплошной слой. Тем не менее наблюдается зависимость морфологии поверхности пленок MoSe_x от параметров магнетронного напыления слоя Мо, как в случае термообработки при 480 °С (рисунок 2). Переход к параметрам напыления с меньшей мощностью (70 Вт) и повышенным расходом газа (100 см³/мин) приводит к увеличению плотности крупных пластинчатых частичек, которые образуют более развитую структуру.

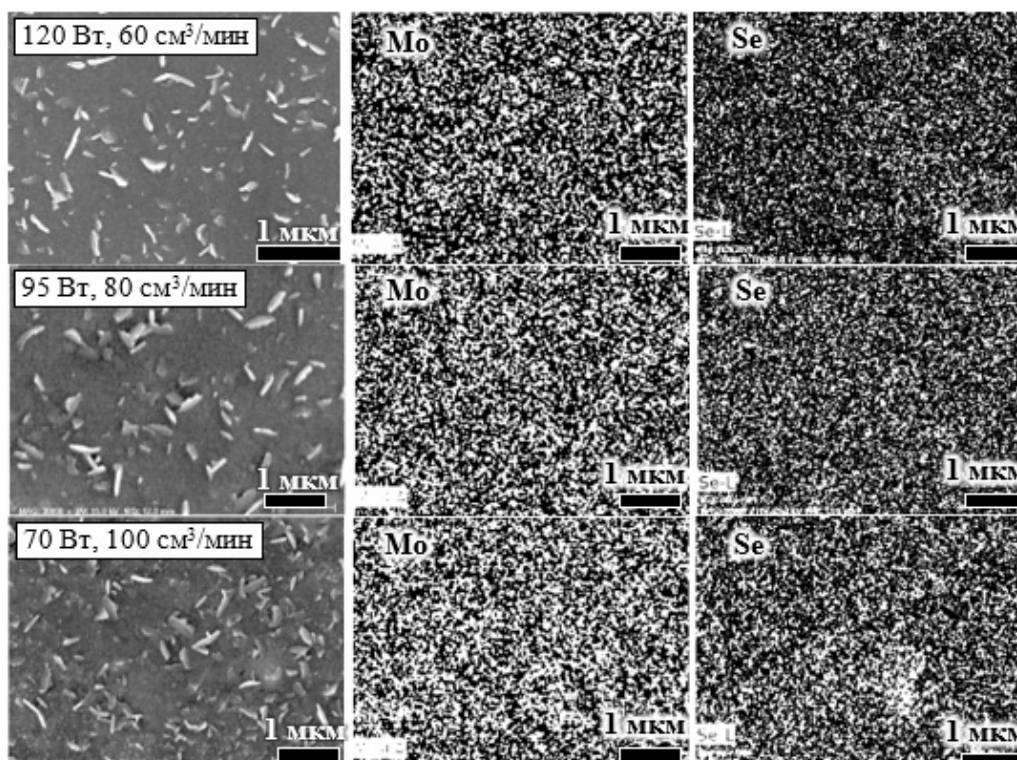


Рисунок 3 – Микрофотографии с картами распределения элементов (Mo и Se) пленок MoSe_x , отожженных при 750°C в течение 40 мин (исходная технологическая толщина слоя Mo – 8 нм)

На СЭМ-изображениях (рисунок 4) видно, что пленки MoSe_x состоят из сплошного тонкого слоя и выраженных крупных частиц, выступающих из него; при этом крупные частицы ориентированы преимущественно вертикально или под небольшим углом к подложке. Сплошной слой выглядит плотным, а его толщина варьируется в диапазоне 55–100 нм в зависимости от параметров синтеза пленок, в то время как верхние кристаллы имеют чешуйчатую или каплевидную структуру, что является характерным для MoSe_x [7], [15], [20].

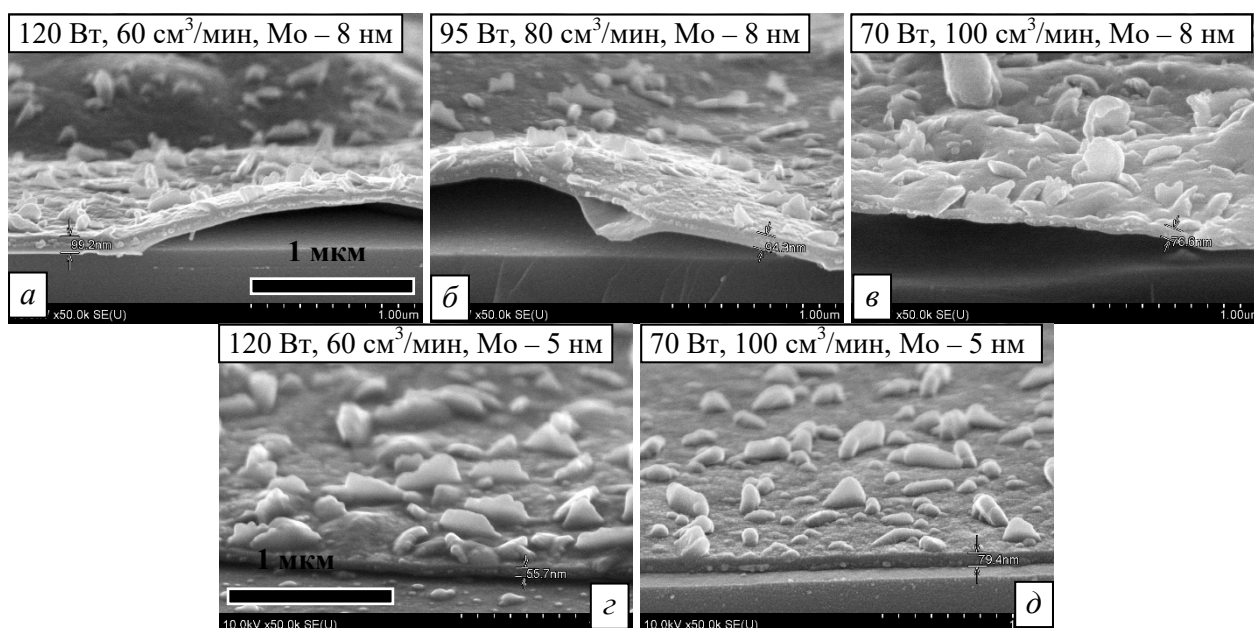


Рисунок 4 – Микрофотографии пленок MoSe_x на кремниевых подложках, полученных при 750°C в течение 40 мин, в зависимости от параметров магнетронного напыления Mo (указаны на рисунке)

Значительное увеличение толщины пленки MoSe_x в 11–16 раз по сравнению с исходным слоем Mo обусловлено совокупностью нескольких факторов, среди которых можно выделить,

во-первых, расширение кристаллической решетки в результате встройки атомов селена (переход от кубической к слоистой гексагональной структуре), во-вторых, морфологические особенности (формирование вертикально ориентированных слоев относительно подложки; микропористость). При этом влияние параметров магнетронного напыления (мощность и расход Ar) на итоговую толщину пленки MoSe_x имеет противоположный характер в зависимости от толщины исходного слоя Mo. В случае слоя Mo толщиной 8 нм снижение мощности и увеличение расхода Ar приводит к уменьшению толщины пленки от ~99 нм до ~77 нм при селенизации. Доминирующим фактором уменьшения толщины является, вероятно, термическое уплотнение структуры пленки: внедряющийся селен заполняет внутренние поры, в то время как общая высота слоя сокращается из-за спекания рыхлой мелкозернистой структуры. Напротив, для исходного слоя Mo толщиной 5 нм те же изменения параметров приводят к увеличению толщины пленки с ~56 нм до ~80 нм. Благодаря малой толщине металлического слоя происходит формирование стехиометрического состава MoSe_2 , что обеспечивает рост крупных кристаллов MoSe_2 . В этом случае эффект спекания оказывается менее значимым, чем значительный прирост объема, обусловленный переходом от дефицитной по селену фазы к полноценному соединению MoSe_2 .

Заключение. В работе исследованы закономерности формирования пленок MoSe_x на подложках из кремния в зависимости от параметров магнетронного напыления и последующей селенизации. Показано, что варьирование мощности распыления (70–120 Вт) и расхода аргона (60–100 см³/мин) позволяет эффективно управлять размером и плотностью напыляемых частиц Mo на подложку. Снижение энергии осаждаемых частиц способствует формированию мелкозернистой структуры молибденового слоя, что является определяющим фактором для достижения стехиометрического состава MoSe_2 . Установлено, что фазообразование MoSe_x происходит при температуре селенизации 750 °С. Снижение температуры до 480 °С препятствует синтезу диселенида молибдена, но инициирует изменение морфологии исходных частиц Mo. Выявлено, что при заданных режимах термообработки (750 °С, 40 мин) полная селенизация достигается для слоев Mo толщиной 5 нм. Для слоев толщиной 8 нм процесс ограничивается объемной диффузией, что приводит к образованию фаз нестехиометрического состава. Полученные результаты позволяют оптимизировать режимы синтеза наноструктурированных пленок MoSe_x с заданными параметрами и демонстрируют возможность управления их составом и морфологией через микроструктуру исходного слоя молибдена.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке БРФФИ и ГКНТ (№ Т24КИТГ-013).

Литература

1. Recent Advances in Transition Metal Dichalcogenide Cathode Materials for Aqueous Rechargeable Multivalent Metal-Ion Batteries / Vo Pham Hoang Huy, Yong Nam Ahn, Jaehyun Hur // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1517.
2. Recent Progress in Transition Metal Dichalcogenides for Electrochemical Biomolecular Detection / S. Madhurantakam, G. Mathew, B. E. David [et al.] // *Micromachines*. – 2023. – Vol. 14. – P. 2139.
3. Recent advances in two-dimensional van der Waals magnets / Hang Xu, Shengjie Xu, Xun Xu [et al.] // *Microstructures*. – 2022. – Vol. 2. – P. 2022011.
4. A review on applications of molybdenum disulfide material : Recent developments / G. Anushya, M. Benjamin, R. Sarika [et al.] // *Micro and Nanostructures*. – 2024. – Vol. 186. – P. 207742.
5. Review on 2D Molybdenum Diselenide (MoSe_2) and Its Hybrids for Green Hydrogen (H_2) Generation Applications / M. B. Wazir, M. Daud, S. Safeer [et al.] // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7. – P. 16856–16865.
6. Facile Synthesis of Molybdenum Diselenide Layers for High-Performance Hydrogen Evolution Electrocatalysts / D. Vikraman, S. Hussain, K. Akbar [et al.] // *ACS Omega*. – 2018. – Vol. 3. – P. 5799–5807.
7. Eftekhari, A. Molybdenum diselenide (MoSe_2) for energy storage, catalysis, and optoelectronics / Ali Eftekhari // *Applied materials today*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1–17.
8. Eda, G. Two-Dimensional Crystals : Managing Light for Optoelectronics / G. Eda, S. A. Maier // *CS Nano*. – 2013. – Vol. 7, № 7. – P. 5660–5665.
9. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides / Qing Hua Wang, K. Kalantar-Zadeh, Andras Kis [et al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 7. – P. 699–712.

10. Intercalation in two-dimensional transition metal chalcogenides : interlayer engineering and applications / G. Dibyendu, D. Pooja, K. Praveen // *Progress in Energy*. – 2022. – Vol. 4, № 2. – P. 022001.
11. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets / Manish Chhowalla, Hyeon Suk Shin, Goki Eda [et al.] // *Nature chemistry*. – 2013. – Vol. 5. – P. 263–275.
12. Unveiling ferromagnetism and antiferromagnetism in two dimensions at room temperature / Ravel de Moraes Telles Araujo, J. Zarpellon, D. H. Mosca // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2022. – Vol. 55. – P. 283003.
13. Advanced Strategies in Synthesis of Two-Dimensional Materials with Different Compositions and Phases / Yang Yang, Lin Jia, Dainan Wang [et al.] // *Small Methods*. – 2023. – Vol. 7. – P. 2201585.
14. Annealing Temperature Effect on the Surface Properties of the MoSe Thin Films / Jinhee Choi, Juyun Park, Jisoo Kang [et al.] // *Physical Status Solidi* – 2023. – Vol. 220, № 21. – P. 2300477.
15. Effects of Mo films prepared via different sputtering conditions on the formation of MoSe_2 during selenization / Yong-Jian Liu, Chang-Ying Ou, Chung-Hsin Lu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 747. – P. 621–628.
16. Effect of magnetron sputtering process parameters on the conductivity of thin metal film / Shuangjie Liu, Xingwang Li, Yongping Hao [et al.] // *AIP Advances*. – 2023. – Vol. 13. – P. 095326.
17. Influence of Radio Frequency Magnetron Sputtering Parameters on the Structure and Performance of Al and Al_2O_3 Thin Films / R. Ramos Blazquez, F. Solís-Pomara, A. Fundorab [et al.] // *East European Journal of Physics*. – 2025. – Vol. 3. – P. 505–511.
18. Effects of RF Magnetron Sputtering Power on the Mechanical Behavior of Zr-Cu-Based Metallic Glass Thin Films / Tra Anh Khoa Nguyen, Nhat Minh Dang, Chi-Hang Lin [et al.] // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13, № 19. – P. 2677.
19. Bose, Sudhangshu *High Temperature Coatings* / Sudhangshu Bose. – Manchester : Elsevier Science & Technology Books, 2007. – P. 5–16.
20. Atomic Layer Deposition of MoSe_2 Using New Selenium Precursors / Raul Zazpe, Jaroslav Charvot, Richard Krumpole [et al.] // *FlatChem*. – 2020. – Vol. 21. – P. 100166.

¹Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению

²ГЦ «Белмикрoанализ» НТЦ ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Пекинский Университет

Поступила в редакцию 18.03.2026

Феноменологическое моделирование и экспериментальная оценка скорости плазменного травления кремния в комбинированном разряде

М.С. ЛУШАКОВА¹, С.И. МАДВЕЙКО¹, А.Н. КУПО²

Представлена феноменологическая модель плазменного травления монокристаллического кремния в плазме CF_4 при остаточном давлении $p = 20\text{--}100$ Па с применением комбинированного разряда при частотах: НЧ-генератора – 33 ± 1 кГц и СВЧ-генератора – $2,45 \pm 0,01$ ГГц. Проведена аппроксимация экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов, в результате которой получены теоретические зависимости скорости травления от давления в рабочей камере и мощностей СВЧ и НЧ генераторов.

Ключевые слова: плазменное травление, монокристаллический кремний, феноменологическая модель, комбинированный разряд.

The paper presents a phenomenological model of plasma etching of monocrystalline silicon in CF_4 plasma at residual pressure of $p = 20\text{--}70$ Pa using a combined discharge at frequencies of 33 ± 1 kHz for LF generator and $2,45 \pm 0,01$ GHz for microwave generator. The approximation of experimental data using the least squares method was carried out, resulting in theoretical dependencies of the etching rate on pressure in the working chamber and the power of the microwave and low-frequency generators.

Keywords: plasma etching, monocrystalline silicon, phenomenological model, combined discharge.

Введение. В современной технологии производства приборов микро- и нанoeлектроники широкое применение находят методы, основанные на использовании направленных потоков заряженных частиц, энергия которых достаточна для реализации неравновесных физико-химических процессов на поверхности подложки. В частности, для реализации вакуумно-плазменных методов обработки и модификации материалов и структур, а также при создании тонкопленочных структур на подложке [1]–[4].

В настоящее время в производстве изделий электроники широко используется ионно-химическое травление. Для реализации высоких скоростей травления и контролируемых селективности и анизотропии используется принцип периодического изменения концентрации химически активных частиц (ХАЧ) с одновременным изменением энергии ионов плазмы [5].

Равномерность травления по всей площади обрабатываемого материала определяется однородностью диффузии реагирующих активных частиц и потоком ионов к поверхности пластины. На данный момент применяется эмпирический подход в определении оптимальных параметров, таких как мощность, давление, поток газа, для достижения достаточного уровня равномерности для определенных конструкций установок. Одним из вариантов организации направленного высококонцентрированного потока активных частиц к поверхности обрабатываемого материала является использование разрядных устройств, сочетающих в едином рабочем объеме различные способы возбуждения и поддержания плазмы, такие как низкочастотный (НЧ) или высокочастотный (ВЧ) электродные разряды для создания направленного потока частиц и сверхвысокочастотный (СВЧ) безэлектродный разряд, позволяющий существенно увеличить концентрацию травящих частиц.

Целью работы является разработка феноменологической модели, устанавливающей связь между параметрами формирования комбинированного разряда (сверхвысокочастотного и низкочастотного) и скоростью плазменного травления монокристаллического кремния, а также сопоставление полученных модельных оценок с экспериментальными данными.

Конструкция комбинированного разрядного устройства и методика эксперимента.

Конструкция комбинированного (СВЧ+НЧ) разрядного устройства представляет собой замкнутый в кольцо СВЧ волновод, являющийся цилиндрическим резонатором, с расположенной на его оси реакционной разрядной камерой с двумя плоскопараллельными электродами (потенциальным и заземленным), подключенными к НЧ генератору (рисунок 1) [6]–[8].

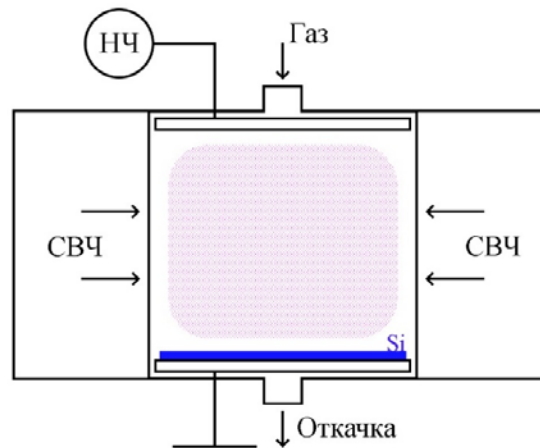


Рисунок 1 – Схема комбинированного разрядного устройства

Ввод электромагнитной энергии СВЧ диапазона в вакуумируемую рабочую область осуществляется посредством щелевых излучателей на внутренней стенке кольцевого волновода. Реакционно-разрядная камера представляет собой цилиндрическую трубу из прозрачного для СВЧ волн кварцевого стекла. В нижнем торце камеры расположен заземлённый держатель обрабатываемой Si подложки. При одновременном взаимодействии СВЧ и НЧ полей с газом пониженного давления в реакционно-разрядной камере формируется плазма самостоятельного комбинированного разряда, под действием которого в объёме камеры осуществляются процессы плазменной обработки, в частности травление монокристаллического кремния. Высота рабочей камеры при проведении экспериментов составляла 90 мм.

Действующее значение мощности СВЧ генератора W в составе комбинированной разрядной системы определялось согласно калибровочной схеме (рисунок 2). Подробно методика эксперимента описана в [9]. Исходя из полученных результатов установлено, что доля эффективного значения мощности СВЧ генератора относительно выходной мощности источника питания СВЧ генератора составляет $\sim 25\%$.

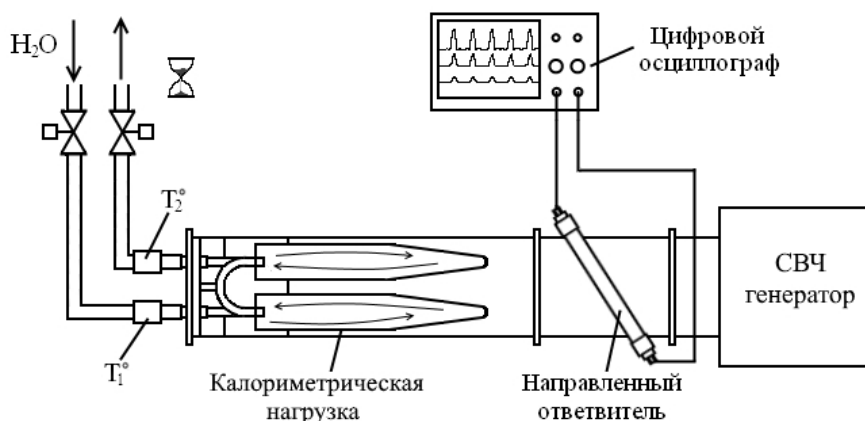


Рисунок 2 – Калибровочная схема для определения действующего значения мощности СВЧ генератора

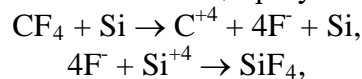
Эффективное значение вкладываемой мощности НЧ генератора в составе комбинированной разрядной системы определялось исходя из его выходной мощности с учетом потерь при генерации плазмы на нагрев, излучение и поддержание плазмы, и составляла $\sim 15\%$ от выходной мощности.

В процессе обработки использовались пластины кремния с нанесенным на их поверхности рисунком металлизации. Скорость травления кремния оценивалась по глубине полученных канавок в незащищенных металлизацией местах, которая измерялась интерферометрическим методом. Измерение глубины канавки травления после обработки выполнялось в пяти независимых «точках» подложки не менее десяти раз. Результаты обрабатывались в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 при обработке результатов прямых измерений.

Экспериментальные результаты травления кремния с окнами металлизации получены при обработке в газовой плазме CF_4 . Были использованы пластины с кристаллографической ориентацией 111. Рабочая частота НЧ генератора составляла 33 ± 1 кГц, частота СВЧ генератора – $2,45 \pm 0,01$ ГГц.

Моделирование и анализ результатов. Одним из важнейших параметров технологического процесса травления материалов является эффективное значение мощности, вкладываемой в разряд. Данный параметр оказывает воздействие на количество активных частиц в плазме, изменяя тем самым плотность плазмы, и на энергию активных частиц, что влияет на скорость и селективность травления. Изменяя мощность, можно контролировать и управлять кинетикой процесса травления, достигая оптимальных скоростей, при этом сохраняя селективность.

В соответствии с механизмом плазменного травления, будем полагать, что средняя кинетическая энергия $\langle E_k \rangle$ химически-активных частиц в результате диссоциации CF_4 :



пропорциональна суммарной мощности генераторов с учётом энергозатрат каждого из них, задаваемого с помощью коэффициентов α и β :

$$\langle E_k \rangle = (\alpha \cdot W_{\text{НЧ}} + \beta \cdot W_{\text{СВЧ}}) \cdot \tau = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{n}, \quad (1)$$

где α и β – безразмерные коэффициенты пропорциональности, определяемые эмпирически; n – концентрация ХАЧ, $1/\text{см}^3$; τ – время работы генератора, с.

Кроме того, средняя длина свободного пробега ионов (с учётом, что концентрации анионов и катионов отличаются в четыре раза) может быть определена по формуле [10]:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot n}, \quad (2)$$

где d – эффективный диаметр сферы взаимодействия ХАЧ («диаметр молекулы»), нм.

При расчёте эффективного диаметра взаимодействия d учитываются только основные химически активные частицы – атомарный фтор (F) и углерод (C). Молекулы исходного газа CF_4 и продукты реакции SiF_4 не включены в модель, поскольку их концентрация в зоне активного травления значительно ниже концентрации активных частиц, а их учёт изменяет значение d не более чем на 10 %, что находится в пределах погрешности экспериментальных данных. Таким образом, в рамках феноменологической модели предложенное упрощение является допустимым.

Поскольку для углерода (C) параметр $d_1 = 0,70$ нм, а для фтора (F) – $d_2 = 0,73$ нм, то будем полагать, что [11]: $d = 0,2 \cdot d_1 + 0,8 \cdot d_2$

Выражение (2) с учётом (1) можно записать:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\sqrt{2} \cdot (\alpha \cdot W_{\text{НЧ}} + \beta \cdot W_{\text{СВЧ}}) \cdot \tau}{3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot P}, \quad (3)$$

Скорость травления Si в среде CF_4 определяется двумя противодействующими процессами. С одной стороны, она растёт по мере увеличения средней кинетической энергии активных частиц, которая пропорциональна суммарной мощности газоразрядной плазмы с учётом эмпирических коэффициентов α и β . С другой стороны, скорость травления зависит от давления в разрядной камере: при низких давлениях скорость ограничена малой концентрацией химически активных частиц, а при высоких давлениях возрастает вероятность столкновений ионов, так как уменьшается длина их свободного пробега, что также снижает скорость травления. Таким образом, зависимость скорости от давления имеет максимум, что подтверждается экспериментальными данными.

Средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ служит в модели ключевым параметром, связывающим давление и мощность со скоростью травления. Как было указано выше, уменьшение $\langle \lambda \rangle$ при росте давления увеличивает частоту столкновений, что снижает поток активных частиц на подложку. Именно эта вероятность, зависящая от $\langle \lambda \rangle$ через распределение (4), определяет кинетику травления в предлагаемой феноменологической модели.

$$f(\lambda) = \frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi} \cdot \langle \lambda \rangle^3} \cdot \lambda^2 \exp\left(-\left(\frac{\lambda}{\langle \lambda \rangle}\right)^2\right) d\lambda, \tag{4}$$

Как известно, функция распределения $f(\lambda)$ представляет собой относительную долю частиц, обладающих длиной свободного пробега в интервале от $\lambda - d\lambda$ до $\lambda + d\lambda$. Скорость травления пропорциональна вероятности формирования новых анион-катионных пар в результате столкновения нейтральных атомов. Эту вероятность можно определить как значение интеграла функции (4) вблизи длины волны 0,0612 м, что соответствует половине длины стоячей волны в резонаторе при указанной ранее частоте СВЧ колебаний.

Для оценки скорости травления необходимо знать долю частиц, способных преодолеть расстояние, равное половине длины стоячей волны в резонаторе (0,0612 м), без столкновения. Вероятность такого события $P(\lambda \geq 0,0612)$ определяется интегрированием функции распределения (4) в малой окрестности указанного значения. На рисунке 3 представлена зависимость этой вероятности от давления в рабочей камере.

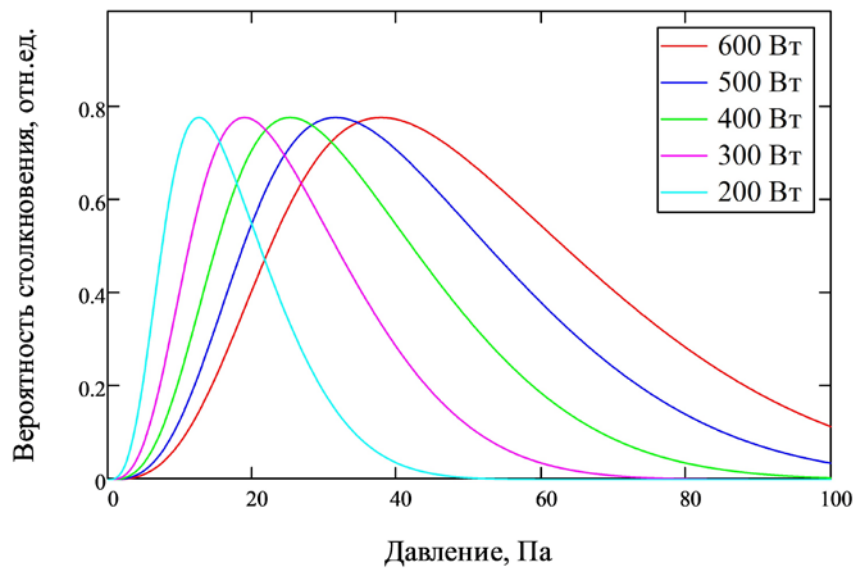


Рисунок 3 – Зависимость вероятности столкновения $P(\lambda \geq 0,0612)$, определяющей частоту образования ХАЧ, от давления в рабочей камере при различных значениях эффективной суммарной мощности плазмы

На рисунке 4 изображена зависимость вероятности столкновения от эффективной мощности генераторов при различных давлениях в рабочей камере. Обе теоретические зависимости в общих аспектах согласуются с известными экспериментальными данными [6]–[8], но для оценки фактических значений скорости травления требуется расчёт дополнительных эмпирических коэффициентов (формула (1)), связанных с различным энерговыделением СВЧ и НЧ генераторов.

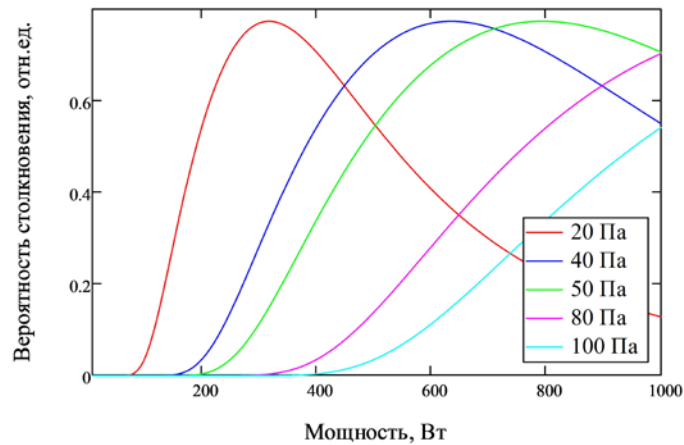


Рисунок 4 – Зависимость вероятности столкновения $P(\lambda \geq 0,0612)$, определяющей частоту образования ХАЧ, от эффективной суммарной мощности генераторов при различных давлениях в рабочей камере

Поиск эмпирических коэффициентов базировался на результатах экспериментальных исследований травления кремниевых пластин в реакционно-разрядной камере при различных давлениях в плазме комбинированного разряда. Также экспериментально оценивалось влияние изменения мощности плазмы комбинированного разряда. Оба цикла экспериментов проводились в течение 30 секунд.

Величины скорости травления кремниевых пластин для различных давлений в реакционно-разрядной камере в плазме комбинированного разряда сведены в таблицу 1. В исследованном диапазоне давлений от 20 до 100 Па скорости травления кремния варьировались от 0,5 нм/с до 34 нм/с. При этом оптимальным давлением для проведения процесса травления со скоростью травления кремния 30–32 нм/с является диапазон 50–70 Па.

Таблица 1 – Значения скорости травления $v (\pm 5 \%)$ Si в зависимости от давления в реакционно-разрядной камере в плазме комбинированного разряда ($W_{\text{СВЧ}} = 378$ Вт, $W_{\text{НЧ}} = 85$ Вт, $\tau = 30$ с).

p , Па	20	30	40	45	50	60	70	80	90	100
v , нм/с	0,5	8,5	15,8	23,0	28,6	34,1	31,7	26,0	22,9	21,3

Кроме того, экспериментально получены величины скорости травления кристаллического кремния в тетрахлорметане в зависимости от мощностей СВЧ и НЧ генераторов (таблица 2). Мощностные характеристики СВЧ и НЧ составляющих комбинированного разряда варьировались в следующих пределах: мощность НЧ генератора – 40–85 Вт, мощность СВЧ генератора 194–385 Вт.

Таблица 2 – Значения скорости травления $v (\pm 5 \%)$ Si в зависимости от мощности плазмы в реакционно-разрядной камере комбинированного разряда ($p = 60$ Па, $\tau = 30$ с, расход газа 6 л/ч).

Мощность НЧ-генератора ($W_{\text{нч}}$) 40 Вт					
$W_{\text{свч}}$, Вт	194	233	270	331	385
v , нм/с	7,7	14,9	10,3	21,7	19,8
Мощность НЧ-генератора ($W_{\text{нч}}$) 65 Вт					
$W_{\text{свч}}$, Вт	194	233	270	331	385
v , нм/с	13,3	17,4	25,3	31,4	30,0
Мощность НЧ-генератора ($W_{\text{нч}}$) 85 Вт					
$W_{\text{свч}}$, Вт	194	233	270	331	385
v , нм/с	26,1	32,9	34,0	35,7	31,3

Данные, представленные в таблицах 1 и 2, можно сопоставить с вероятностью столкновения путём расчёта эмпирических коэффициентов α и β , и нормировочного множителя γ , позволяющего соотнести в виде прямо пропорциональной зависимости вероятность образования ионных пар и скорость травления. Для этого используем классический метод наименьших квадратов [10].

$$\sum_i \left(v_i - \gamma \cdot \int_{\lambda-d\lambda}^{\lambda+d\lambda} f(\alpha, \beta, W_{НЧ}, W_{СВЧ}, P_i, \lambda) d\lambda \right)^2 \rightarrow \min,$$

где γ – эмпирический коэффициент пропорциональности между скоростью травления и вероятностью образования новых катион-анионных пар в плазме комбинированного разряда.

В предлагаемой феноменологической модели скорость травления монокристаллического кремния v полагается пропорциональной вероятности столкновения, определяющей частоту образования ХАЧ. Эта вероятность рассчитывается как интеграл от функции распределения (4) в интервале длин свободного пробега, вблизи половины длины стоячей волны в резонаторе (0,0612 м). Размерный коэффициент пропорциональности γ (м/с) связывает безразмерную вероятность с линейной скоростью удаления материала.

На рисунках 5 и 6 представлены результаты аппроксимации, которые соответствуют значениям $\alpha = 1,316 \cdot 10^{-21}$ отн.ед., $\beta = 6,496 \cdot 10^{-21}$ отн.ед. и $\gamma = 80,245$ м/с при значении $d\lambda = 0,013$ м. Экспериментальные значения скорости травления, для удобства представлены в нм/с, что не влияет на форму зависимостей и их сопоставление с моделью.

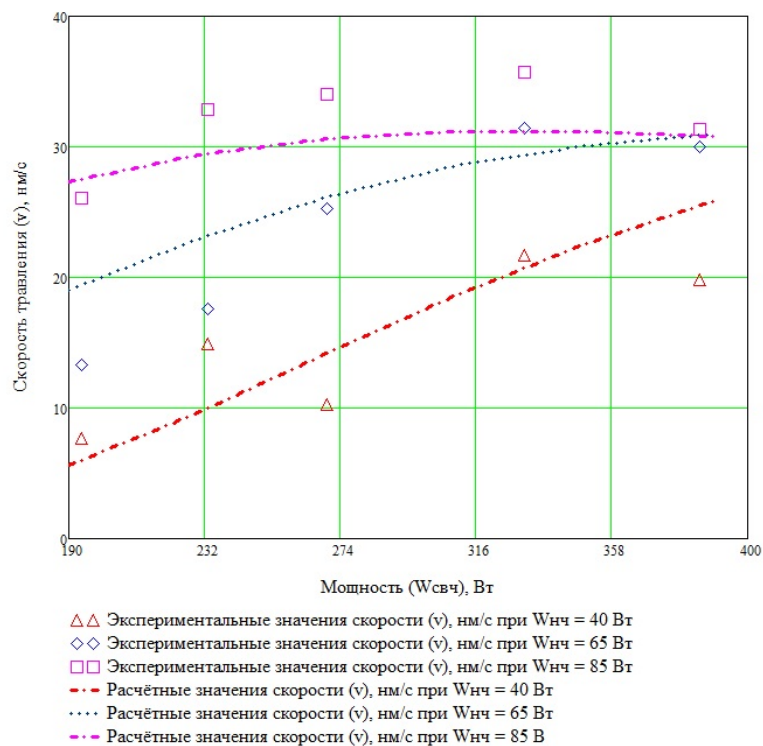


Рисунок 5 – Аппроксимации экспериментальной зависимости скорости травления кремния от мощностей СВЧ и НЧ генераторов

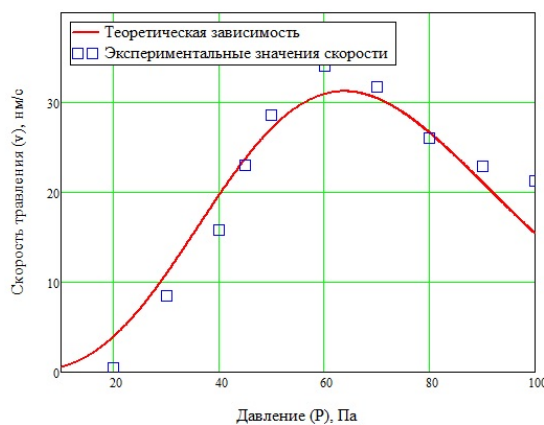


Рисунок 6 – Аппроксимации экспериментальной зависимости скорости травления кремния от давления в реакционной камере

Полученные теоретические зависимости соответствуют экспериментальным данным в пределах погрешности, не превышающей 13 %. Такое незначительное расхождение можно объяснить особенностями проведения экспериментальных исследований: изменение размеров резонирующего объёма, различным эффективным расходом газовой смеси, т. е. концентрацией частиц, а также неизбежными погрешностями прямых измерений.

Заключение. Представленная феноменологическая модель позволяет оценить влияние основных параметров процесса плазменного травления кристаллического кремния в тетрахлорметане, таких как давление в рабочей камере (20–100 Па), мощности НЧ и СВЧ составляющих плазмы комбинированного разряда в камере, и режимов её генерации на скорость указанного процесса. Результаты работы могут быть востребованы в ряде технологий современной микроэлектроники.

Литература

1. Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Весці НАН Беларусі. Сер.: Фіз.-тэхн. навукі. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176
2. Технологические процессы осаждения и травления в технологии изготовления ИМС и МЭМС : учеб.-метод. пособ. / Д. А. Котов, Ю. А. Родионов, А. А. Ясюнас [и др.]. – Минск : БГУИР, 2020. – 68 с.
3. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учеб. пособ. / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Молчанов ; под ред. С. П. Тимошенко. – М., 2010. – 283 с.
4. Кудря, В. П. Применение технологии пучков быстрых нейтральных частиц в микро- и микроэлектронике / В. П. Кудря, Ю. П. Майшев // Микроэлектроника – 2018. – Т. 47, № 5. – С. 51–63.
5. Технологии субмикронных структур микроэлектроники / А. П. Достанко, С. В. Бордусов, Д. А. Голосов [и др.] ; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2018. – 270 с.
6. Лушакова, М. С. Исследование влияния конструктивных характеристик плазменной камеры на режимы возбуждения СВЧ разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Приборостроение-2022 : матер. 15-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 16–18 ноября 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 287–289.
7. Тихон, О. И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания СВЧ магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 42–47.
8. Лушакова, М. С. Исследование влияния режимов работы СВЧ и НЧ генераторов на возбуждение плазмы комбинированного разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики [Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 ноября 2024 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2025. – С. 169–173.
9. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / И. Ф. Бурак, А. В. Гусинский, Г. А. Шаров [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2018. – 328 с.
10. Шершнева, Е. Б. Основы молекулярно-кинетической теории : практич. пособ. / Е. Б. Шершнева, А. Н. Купо, С. А. Лукашевич ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2022. – 31 с.
11. Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума : учеб. пособ. / В. А. Емельянов, Д. Г. Лин, В. Ф. Шолох. – Минск : Бестпринт, 1997. – 90 с.

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 13.04.2026

Краткие сообщения

УДК 599.742.4:591.9(476.2-37Ветка)

EDN: SYRNEG

Находки барсука (*Meles meles*) в Ветковском районе Гомельской области

Л.А. ЛЕВШУНОВА, А.А. САВАРИН

В августе 2022 г. и декабре 2025 г. в Столбунском лесничестве Ветковского лесхоза на участках дороги Р-30 зарегистрировано два случая обнаружения барсука. В первом случае особь была смертельно сбита автотранспортом. Во втором – барсук перебежал ночью дорогу. Расстояние между местами находок составляет около 2 км. Благоприятствуют поселению барсука на данной территории, по нашему мнению, прежде всего, низкая рекреационная нагрузка, большая площадь лесных массивов, холмистый рельеф и протекание рек. Требуется особое изучение вероятности поселения барсука в многочисленных рвах, оставшихся после Второй мировой войны.

Ключевые слова: Красная книга, барсук, Ветковский район, находки.

In August 2022 and December 2025, two cases of badger sightings were registered in the Stolbunsky forestry department of the Vetkovsky forestry enterprise on sections of the R-30 road. In the first case, the individual was fatally hit by a vehicle. In the other one, a badger ran across the road at night. The distance between the sites is about 2 km. In our opinion, the settlement of badgers in this area is favored primarily by low recreational load, large area of forests, hilly terrain and flowing rivers. The possibility of a badger settlement in the numerous ditches left after the Second World War requires special study.

Keywords: Red Book, badger, Vetkovskiy district, findings.

Введение. Барсук обыкновенный (*Meles meles*) на протяжении многих десятилетий является охраняемым видом на территории Беларуси. В последнем издании Красной книги страны этот хищник отнесен к IV категории национальной природоохранной значимости [1]. Численность барсука в Беларуси оценочно составляет до 2800 особей [2]. При этом достоверные сведения по численности вида и даже его обитанию в Ветковском районе Гомельской области отсутствуют. В этой связи полученные нами результаты послужат основой для дальнейшего мониторинга распространения вида на приграничной территории.

Цель работы – проанализировать места находок барсука в 2022–2025 гг. в Ветковском районе, внести дополнения по распространению вида на юго-востоке Беларуси.

Результаты и обсуждение. Первая находка барсука была сделана ночью в августе 2022 г. вблизи агрогородка Светиловичи. Мертвая особь обнаружена на участке дороги Р-30 (Гомель-Ветка-Чечерск-Ямное) (географические координаты участка Столбунского лесничества – 52°47'32.6"N 31°19'56.8"E). Судя по внешнему виду, животное стало жертвой дорожно-транспортного происшествия. Данный участок дороги отличается интенсивным движением. В ночное время скорость транспорта часто превышает безопасную для мигрирующих через дорогу животных.

Вторая особь обнаружена в начале декабря 2025 г. В сумерках на этой же дороге Р-30 (координаты места обнаружения – 52°47'37.1"N 31°21'38.8"E) приблизительно в 00:30 была отмечена живая, активная особь барсука. Животное пересекало проезжую часть по асфальтированной дороге, после короткой пробежки свернуло в лесной массив. Дорога на данном участке не освещается.

Скоростное ограничение на участках, где была обнаружена первая особь, – 40 км/ч, а вторая особь – 90 км/ч. Расстояние между местами находок составляет около 2 км.

Рассматриваемые участки лесничества – смешанный лес с преобладанием березы (рисунок 1). Рельеф холмистый, с превышением высот около 1 м. Есть пониженные увлажненные участки, но заболоченных нет.

По территории Столбунского лесничества протекают реки Беседь, Зборхов, Чемерня, Перелевка, Столбунка, Неглюбка. Данное обстоятельство увеличивает биотопическое разнообразие и, следовательно, и пищевую базу хищника.



А



Б

Рисунок 1 – Участок дороги Р-30 (А) и прилегающий к ней лес (Б)

Лесничества Ветковского лесхоза (Велико-Немковское, Ветковское, Светиловичское и Столбунское) имеют значительную общую площадь 103 390 га [3]. Анализируя место находок барсука (рисунок 2), можно предположить, что его локальная популяция сосредоточена западнее и южнее относительно данного участка дороги.

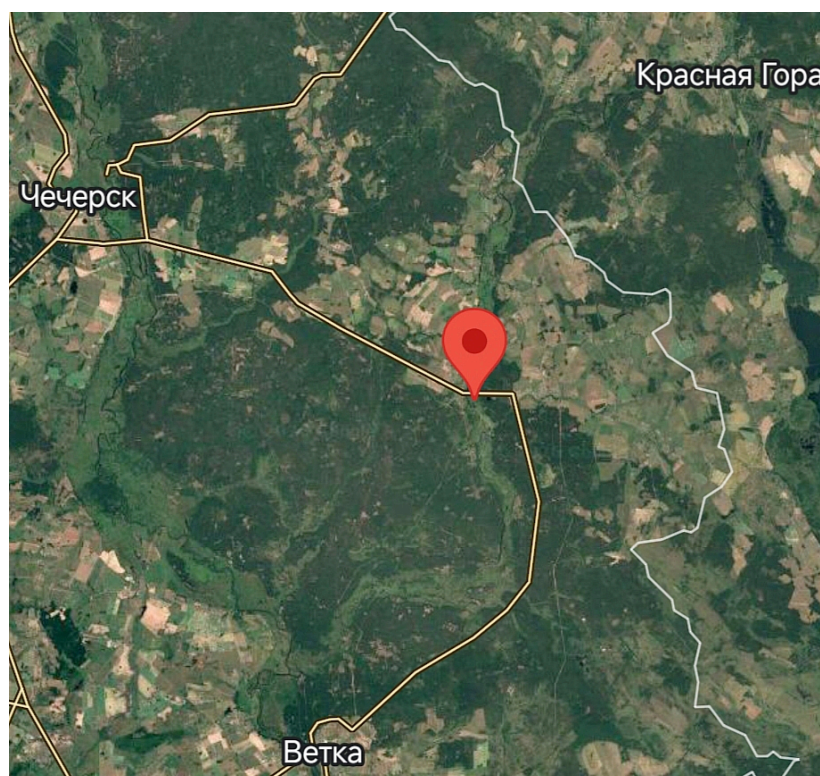


Рисунок 2 – Место обнаружения барсука в Ветковском районе

Следует заметить, что преобладающая часть территории Ветковского спецлесхоза имеет загрязнение почв Cs-137 от 5 и более Ки/км² [3]. Радиационный фактор приводит к снижению рекреационной нагрузки на лесные экосистемы, следовательно, и на популяцию барсука. Аналогичная ситуация наблюдается и в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике [4].

Заключение. Приведенные сведения о двух встречах (в 2022 г. и 2025 г.) подтверждают обитание барсука в Ветковском спецлесхозе. Благоприятствуют поселению барсука на данной территории, по нашему мнению, прежде всего, низкая рекреационная нагрузка, большая площадь лесных массивов, холмистый рельеф и протекание рек. Требуется особого изучения вероятность поселения барсука в многочисленных рвах, оставшихся после Второй мировой войны.

Гибель барсука на дорогах в Гомельской области подтверждают и другие исследования [5]. Полагаем, что после уточнения мест обитания барсука в Столбунском и других лесничествах на соответствующих участках дорог также следует ограничить скорость движения, особенно в ночное время, с установкой предупреждающего знака «Дикие животные».

Литература

1. О редких и находящихся под угрозой исчезновения видах диких животных и дикорастущих растений, включаемых в Красную книгу Республики Беларусь: постановление М-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 14 марта 2025 г. № 10 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22543109> (дата обращения: 03.02.2026).

2. Атлас млекопитающих Беларуси / В. В. Шакун, И. А. Соловей, И. А. Крищук [и др.] ; под общ. ред. В. В. Шакуна; Национальная академия наук Беларуси, Научно-практический центр по биоресурсам. – Минск : Беларуская навука, 2026. – С. 111.

3. Радиоактивное загрязнение территории лесного фонда лесхоза // Ветковский спецлесхоз. – URL: <http://xn---ctbalmcmeigbo4ah9agf6d.xn--90ais/lesnichestva> (дата обращения: 06.03.2026).

4. Биологическое разнообразие животного мира Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / М. Е. Никифоров [и др.] ; под ред. акад. М. Е. Никифорова; Нац. акад. наук Беларуси, НПЦ по биоресурсам, Полес. гос. радиац.-экол. заповедник. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 407 с.

5. Парахневич, К. Е. О находках барсука (*Meles meles*) в Светлогорском районе Гомельской области / К. Е. Парахневич, А. А. Саварин // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2024. – № 6 (147). – С. 113–114.

О находке мокрицы *Ligidium hypnorum* (Cuvier, 1792) на территории Речицкого района Гомельской области

А.М. ОСТРОВСКИЙ

Приведены данные о находке мокрицы *Ligidium hypnorum* на территории Борщевского лесничества Речицкого района Гомельской области. Две особи (самки) были обнаружены 08.05.2023 на заболоченном участке хвойно-лиственного леса с густым подлеском восточнее деревни Борхов. Высказано предположение о биоиндикаторной роли этого вида мокриц.

Ключевые слова: Isopoda, Oniscidea, *Ligidium hypnorum*, мокрицы, находка, Беларусь.

The data on the record of woodlice *Ligidium hypnorum* on the territory of the Borshchevkoye forestry of the Rechitsa district (the Gomel region) are analyzed. Two female specimens were found on 08.05.2023 in a swampy area of coniferous-deciduous forest with dense undergrowth to the east of the Borkhov village. The biomarker role of this woodlice species has been suggested.

Keywords: Isopoda, Oniscidea, *Ligidium hypnorum*, woodlice, finding, Belarus.

Введение. *Ligidium hypnorum* (Cuvier, 1792) – единственный представитель семейства Ligiidae в фауне Беларуси [1]. Указывается для лесной зоны Центральной Беларуси [2], в частности, отмечен в Налибокской [3] и Беловежской [4] пушах, но, по-видимому, распространен гораздо шире, возможно, по всей территории республики. Однако в последней аналитической работе по распространению и численности мокриц на юго-востоке Беларуси [5] сведения по *L. hypnorum* не приведены. В этой связи новые находки важны для понимания современного распространения и оценки численности данного вида на территории Беларуси.

Цель работы – указать место новой регистрации *L. hypnorum* в Гомельской области, высказать точку зрения на биомониторинговые аспекты дальнейших исследований вида.

Материал и методы. Мокриц собирали вручную. Определение проводилось по определительным таблицам Н.Т. Залеской и Л.Б. Рыбалова [6] с помощью микроскопа МБС-10. Для фотографирования использовали Canon PowerShot SX130IS и Xiaomi Redmi Note 8 Pro.

Результаты и их обсуждение. 08.05.2023 у грунтовой дороги на заболоченном участке хвойно-лиственного леса с густым подлеском (рисунок 1) на территории Борщевского лесничества (70 квартал) восточнее деревни Борхов были обнаружены две особи (самки) мокрицы *L. hypnorum*. Географические координаты места находки: 52.421948° 30.621087°.



Рисунок 1 – Место обнаружения *Ligidium hypnorum* в Речицком районе

Комплекс диагностических признаков *L. hypnorum*: длина тела 7–10 мм; поверхность тергитов мраморной окраски; жгутик усика тоньше основания антенны и состоит из 10–13 члеников; задние углы I–III тергитов грудного отдела (переона) округлые; экзоподит уропода стилиевидный, эндоподит тоньше экзоподита, сидит на внутреннем выросте протоподита и оканчивается двумя длинными щетинками. Внешний вид мокрицы представлен на рисунке 2.

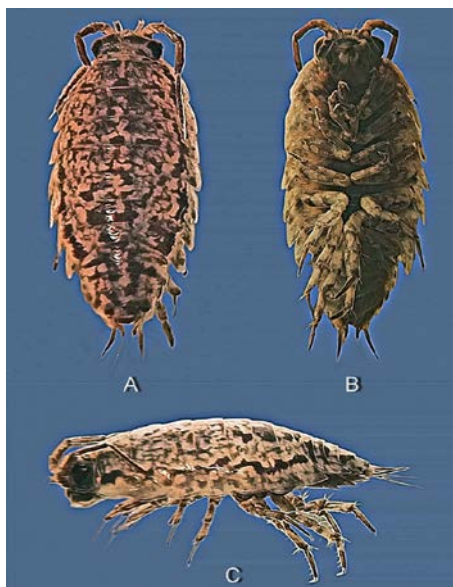


Рисунок 2 – Общий вид самки *Ligidium hypnorum*: А – вид сверху, В – вид снизу, С – вид сбоку

L. hypnorum – голарктический вид; представитель наиболее примитивных мокриц, связанных с водой, для которых характерно отсутствие приспособлений к дыханию атмосферным воздухом, поэтому часто встречается под опавшей листвой в местах береговой линии [6]. В Беларуси обнаружен в условиях высокой влажности по берегам пойменных рек, на пойменных лугах, а также в подстилке и мху во влажных лиственных и смешанных лесах [2].

Согласно [7], существование популяций *L. hypnorum* лимитировано как параметрами местообитаний (уровень грунтовых вод, обилие подстилки, характер травостоя), так и возможностью расселения. В этой связи необходимы мониторинговые исследования с целью выявления района распространения, численности и динамики вида, как возможного индикатора относительно малонарушенных экосистем.

Заключение. Подтверждено обитание мокрицы *L. hypnorum* на территории Речицкого района Гомельской области. Данный вид представляет интерес для биомониторинга в качестве возможного индикатора относительно малонарушенных экосистем.

Литература

1. Ostrovsky, A. Review of the study of woodlice (Crustacea: Isopoda: Oniscidea) in Belarus / A. Ostrovsky // Bulletin of the British Myriapod & Isopod Group. – 2022. – Vol. 34. – P. 83–85.
2. Максимова, С. Л. Видовой состав мокриц (Crustacea, Isopoda, Oniscoidea) в Беларуси / С. Л. Максимова // Весті НАН Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2005. – № 1. – С. 104–106.
3. Maksimova, S. 5.1.2. Species richness of soil invertebrates / S. Maksimova // Naliboki Forest : Land, Wildlife and Human. – Minsk : Four Quarters, 2016. – Vol. II : Wild animals / ed.: V. E. Sidorovich – P. 450.
4. Kuznetsova, D. M. Cartographic analysis of woodlice fauna of the former USSR / D. M. Kuznetsova, K. B. Gongalsky // Advances in Terrestrial Isopod Biology / eds: J. Štrus, S. Taiti, S. Sfenthourakis. – ZooKeys. – 2012. – Vol. 176. – P. 1–11.
5. Островский, А. М. К фауне мокриц (Crustacea: Isopoda: Oniscidea) юго-востока Беларуси / А. М. Островский // Трансформация экосистем. – 2019. – Т. 2, № 2 (4). – С. 69–78.
6. Залеская, Н. Т. Фауна мокриц (Crustacea, Isopoda, Oniscoidea) Москвы и Московской области / Н. Т. Залеская, Л. Б. Рыбалов // Почвенные беспозвоночные Московской области ; отв. ред. М. С. Гиляров. – М. : Наука, 1982. – С. 170–178.
7. Алексанов, В. В. Биотопическое распределение мокрицы *Ligidium hypnorum* Cuvier, 1792 (Isopoda, Oniscidea) в Калужской области / В. В. Алексанов // Актуальные проблемы изучения ракообразных : сб. тез. докл. Четв. Всерос. науч.-практ. конф., пос. Борок Ярославской обл., 23–25 мая 2024 г. / Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН ; редкол.: А. А. Котов [и др.]. – Севастополь : Институт природно-технических систем, 2024. – С. 10.

Межзвёздный объект 3I/ATLAS: реалии и фантазии

М.М. ПУГАЧЁВ, Г.Ю. ТЮМЕНКОВ

Рассмотрены характеристики орбиты и особенности поведения межзвёздного объекта 3I/ATLAS, открытого в июле 2025 г. Отмечены крайне высокий эксцентриситет орбиты межзвёздного объекта, его нетипичный для Солнечной системы химический состав, наличие кометных комы и хвоста. Приведены доводы в пользу естественного происхождения объекта. Представлены результаты авторских наблюдений.

Ключевые слова: межзвёздный объект, эксцентриситет, кома, химический состав, звёздная величина.

The orbital characteristics and behavioral features of interstellar object 3I/ATLAS, which was discovered in July 2025, are considered. The extremely high eccentricity of the object's orbit, its unusual chemical composition and the presence of cometary coma and tail are noted. Arguments are presented in favor of the natural origin of the object. The results of the author's observations are demonstrated.

Keywords: interstellar object, eccentricity, coma, chemical composition, magnitude.

Введение. Объект, временно обозначенный как A11p13Z, впервые наблюдался 1 июля 2025 г. в обсерватории ATLAS Chile (Рио-Уртадо) [1]. Крайне высокий эксцентриситет (около 6) однозначно указывал на межзвёздную природу объекта. В связи с этим он получил обозначение 3I/ATLAS, так как стал третьим из открытых межзвёздных объектов. Вскоре после открытия появились единичные сообщения о наличии у объекта кометного хвоста длиной около 3 угловых секунд. Геометрия орбиты указывала на то, что объект достигнет перигелия 29 октября на расстоянии от Солнца незначительно большем, чем 1 а.е., имея звёздную величину $m = +9,8$ [2]. В это же время в сети и в популярных изданиях стали появляться первые заявления о его возможном техногенном происхождении.

Цель работы – показать характеристики орбиты межзвёздного объекта и указать на его особенности, такие как необычный химический состав, наличие комы и хвоста, как у кометы. Продемонстрировать естественность поведения 3I/ATLAS и возможность его визуального наблюдения с территории Республики Беларусь.

Результаты и обсуждения. Вскоре после открытия объект был найден на архивных снимках вплоть до 14 июня, что позволило значительно уточнить параметры орбиты. Согласно последним данным Лаборатории реактивного движения (JPL) [3], эксцентриситет орбиты объекта имеет значение 6,141 при перигелийном расстоянии 1,356 а.е. Скорость объекта при входе в Солнечную систему равнялась 57,98 км/с. Орбита оказалась ретроградной, с наклоном $175,116^\circ$ к плоскости эклиптики. Двигаясь во внутренней области Солнечной системы, объект сблизился с тремя планетами: 3 октября 2025 – с Марсом до 0,194 а.е., 3 ноября 2025 – с Венерой до 0,649 а.е., 16 марта 2026 – с Юпитером до 0,358 а.е.

Теперь оговорим, как изменялись условия видимости объекта 3I/ATLAS. Вскоре после открытия его видимая величина составляла около +17,5. 2 июля при наблюдении объекта на 3,6-метровом телескопе «Канада-Франция-Гавайи» (CFHT) была замечена слабая кома и хвост длиной около 3 угловых секунд, направленный в сторону Солнца. Вскоре было выяснено, что хвост состоит из пыли, выделяющейся с нагретой Солнцем стороны объекта [4]. К концу августа стал ясно различим и направленный от Солнца хвост, состоящий из газа и мелкой пыли. На рисунке 1 приведено полученное 8-метровым телескопом «Джемини» изображение объекта от 27 августа, на котором виден направленный от Солнца хвост длиной 30 угловых секунд [5].

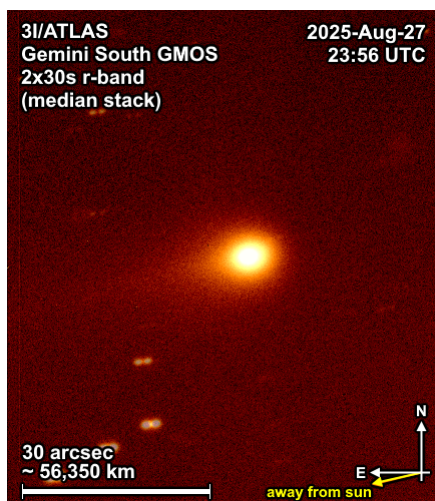


Рисунок 1 – 3I/ATLAS 27 августа 2025.
Фото телескопа «Джемини»



Рисунок 2 – 3I/ATLAS 24 сентября 2025.
Снимок М. Егера и Г. Реманна [6]

Начиная с сентября 2025 г. у объекта наблюдалась типичная для комет зелёная кома, характерный цвет которой обусловлен наличием диуглерода. На рисунке 2 показан вид объекта 24 сентября 2025 г. В это же время наблюдался быстрый рост блеска объекта: от +15 звёздной величины в начале сентября до +12 в конце.

В первой половине октября 2025 г. объект практически не наблюдался из-за близости к Солнцу. Лишь в период с 18 по 24 октября, когда объект находился в поле зрения космических коронографов (SOHO LASCO C3, CCOR-1), он был наблюдаем. 29 октября объект прошёл перигелий своей орбиты на указанном выше расстоянии от Солнца. К началу ноября объект удалился от Солнца на небесной сфере достаточно далеко, чтобы продолжились его регулярные наблюдения с Земли. В это время блеск объекта достиг максимума на уровне звёздной величины +9,8. При этом наблюдались развитая диуглеродная кома диаметром около 5 угловых минут, разветвленный ионный хвост длиной до 1 градуса, а также антихвост. На рисунке 3 представлен вид объекта на 19 ноября 2025 г.



Рисунок 3 – 3I/ATLAS 19 ноября 2025.
Снимок М. Егера и Г. Реманна



Рисунок 4 – 3I/ATLAS 24 декабря 2025.
Гомель. Снимок М.М. Пугачёва ($m = +11,5$)

По мере удаления от Солнца блеск объекта стал постепенно снижаться. К концу декабря видимая величина объекта составляла около +11,5. Яркость зеленой диуглеродной комы и ионного хвоста стала быстро падать; на рисунке 4 уже не удастся различить ни зеленую кому, ни ионный хвост, хотя антихвост все еще остается достаточно ярким.

Заслуживает внимания и химический состав объекта. В августе 2025 г. с помощью космического телескопа «Джеймс Уэбб» (JWST) был получен его спектр в ближнем инфракрасном диапазоне [7]. По результатам этих наблюдений установлено, что кома 3I/ATLAS содержит очень большое количество углекислого газа, намного большее, чем у большинства комет Сол-

нечной системы, за исключением C/2016 R2 (PanSTARRS). В то же время в спектре объекта отсутствовали линии атомарного железа, типичные для комет Солнечной системы. В остальном же 3I/ATLAS схож по своему химическому составу с кометами, принадлежащими Солнечной системе.

Внесолнечное происхождение 3I/ATLAS и его необычный химический состав послужили почвой для множества спекуляций относительно возможной искусственной природы объекта. Так, 16 июля 2025 г. профессор Гарвардского университета Ави Лёб опубликовал статью [8], в которой была выдвинута гипотеза об искусственном происхождении объекта. Среди основных доводов в пользу этой гипотезы: малое наклонение орбиты объекта к плоскости эклиптики, якобы, для планомерного сближения с планетами; отсутствие типичных для комет газов в составе комы; большие размеры объекта. Однако на данный момент все эти доводы выглядят неубедительно. В составе комы 3I/ATLAS все же были обнаружены типичные для комет вещества, хотя и в несколько иных пропорциях, чем у большинства комет Солнечной системы. Размер объекта оказался на порядок меньше, чем предполагалось изначально – всего лишь в пределах от 0,5 до 1 км. Каких-либо элементов техногенного рельефа, ранее демонстрируемых в прессе, на его поверхности выявлено не было. Теперь, что касается целенаправленного расположения орбиты близко к плоскости эклиптики и запланированных сближений с планетами. Естественную вероятность этих фактов Лёб оценивает в 0,002 и 0,00005 соответственно. В настоящее время нам известны всего лишь 3 межзвёздных объекта, а это не позволяет провести сколько-нибудь обстоятельный статистический анализ распределения орбит подобных небесных тел в пространстве.

Закключение. Таким образом, в сообщении отражены основные характеристики и особенности межзвёздного объекта 3I/ATLAS, приведены научные факты, говорящие о его естественном происхождении, и продемонстрирован результат авторских наблюдений.

Литература

1. MPEC 2025-N12: 3I/ATLAS = C/2025 N1 (ATLAS). – URL: <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K25/K25N12.html> (date of access: 15.03.2026).
2. Comet 3I/ATLAS = C/2025 N1. – URL: <https://cobs.si/comet/2643/> (date of access: 16.03.2026).
3. Small-Body Database Lookup. – URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html (date of access: 16.03.2026).
4. As NASA Missions Study Interstellar Comet, Hubble Makes Size Estimate. – URL: <https://science.nasa.gov/missions/hubble/as-nasa-missions-study-interstellar-comet-hubble-makes-size-estimate/> (date of access: 16.03.2026).
5. Gemini South Captures Growing Tail of Interstellar Comet 3I/ATLAS During Educational Observations Program. – URL: <https://noirlab.edu/public/news/noirlab2525/> (date of access: 16.03.2026).
6. 3I/ATLAS. – URL: <https://aerith.net/comet/catalog/0003I/2025N1.html> (date of access: 16.03.2026).
7. Cordiner, M. A. JWST detection of a carbon-dioxide-dominated gas coma surrounding interstellar object 3I/ATLAS / M. A. Cordiner [et al.] // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2025. – V. 991 (2). – L 43.
8. Hibberd, A. Is the interstellar object 3I/ATLAS alien technology? / A. Hibberd, A. Crawl, A. Loeb // *International Journal of Aerodynamic Control & Aviation Mechanics*. – 2025. – V. 1 (1). – P. 1–8.

Ответственный секретарь: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *Е.Н. Федорова, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 25.05.2026. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 12,76. Тираж 20 экз. Заказ № 321.
Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:
издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.