

ISSN 1609–9672

# ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета  
имени Ф. Скорины

---

№ 6 (141)

*Естественные науки*

2023

Гомельский государственный университет  
имени Ф. Скорины

## ИЗВЕСТИЯ

Журнал зарегистрирован в Министерстве информа-  
ции 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, чл.-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.,  
чл.-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](mailto: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. Shlyahova,** 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, Correspond-  
ing 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](mailto:vesti@gsu.by)  
Site: <http://vesti.gsu.by>

© Учреждение образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины», 2023  
© Educational Establishment «Francisk Skorina Gomel State  
University», 2023

# ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета  
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.  
Выходит 6 раз в год

• 2023, № 6 (141) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### Биология

- Бачура Ю.М., Вавилова А.С. Оценка влияния альгоцианобактериальных комплексов на рост и развитие озимой ржи в модельных экспериментах ..... 5
- Галиновский Н.Г., Потапов Д.В. Сообщества жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) в окрестностях скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения (Республика Беларусь)..... 11
- Карпенко А.Ф., Антипенко О.Н. Сорбент цезия-137 белорусского производства в рационах животных ..... 17
- Колбас Н.Ю. Ингибирование автоокисления адреналина *in vitro* при участии тролокса, аскорбиновой и галловой кислот ..... 21
- Концевая И.И., Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Медведская Т.А. Влияние инокулянта «Ресойлер» на взаимоотношения основных эколого-трофических групп микроорганизмов в посевах озимой ржи ..... 28
- Лазарева М.С., Климович Л.К. Структура дубовых насаждений подзоны широколиственно-сосновых лесов..... 34
- Макаренко А.И., Мороз М.Д. Фауна пиявок (Hirudinea: Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) малых рек Минской возвышенности ..... 41
- Потапенко А.М., Козлов А.К., Митин Н.В., Толкачева Н.В., Машков И.А. Особенности накопления <sup>137</sup>Cs в компонентах наземной фитомассы березовых насаждений на территории дальней зоны чернобыльских выпадений в условиях изменения уровня грунтовых вод..... 45
- Соколов Л.В., Соколова А.А. К вопросу о северной границе распространения бело-зубки малой (*Crocidura suaveolens*, Pallas 1811) на территории Беларуси ..... 52
- Храмченкова О.М., Матвеевков М.В. Фотозащитные, антиоксидантные и цитотоксические свойства экстрактов из двух видов полипоровых грибов..... 57
- Ярмош В.Г., Звягинцев В.Б. Отработка методики и оценка эффективности контроля микозов древесных растений методом стволовых инъекций..... 62

### ИНФОРМАТИКА

- Аксёнова Н.А., Сыч Д.С., Воруев А.В. Методика построения трехмерных структур на основе особых точек углов..... 69

Сукач Е.И., Кончиц А.П., Лукашевич Н.С. <i>Имитационное моделирование процесса распространения вирусной инфекции</i> .....	76
Тарасова Ю.А. <i>Анализ системного дизайна и архитектуры современных приложений</i> .....	81
<b>МАТЕМАТИКА</b>	
Монахов В.С., Ходанович Д.А. <i>О классе конечных групп, факторизуемых субнормальными сверхразрешимыми подгруппами</i> .....	86
Немилостивая В.А., Малинковский Ю.В. <i>Сети Джексона с однолинейными станциями и экспоненциальными ограничениями на времена ожидания требований</i> .....	92
<b>ФИЗИКА</b>	
Гиргель С.С. <i>Векторные декартовы пучки Куммера-Гаусса. I. Однородная поляризация. Энергетические свойства</i> .....	98
Дей Е.А., Тюменков Г.Ю. <i>Применение приведенных переменных в задачах аналитической термодинамики</i> .....	104
Никитюк Ю.В., Сердюков А.Н., Аушев И.Ю. <i>Оптимизация лазерного раскалывания силикатных стекол эллиптическими пучками при дополнительном воздействии потока горячего воздуха</i> .....	110
Фаняев И.А., Самофалов А.Л., Кравченко А.Ю., Семченко И.В., Хахомов С.А. <i>Метаповерхность с функцией пропускающего кросс-поляризатора на основе одновитковых планарных спиралей</i> .....	117
<b>ЭЛЕКТРОНИКА</b>	
Шершнёв Е.Б. <i>Термохимическая обработка алмаза движущимся лазерным источником</i> .....	123
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>	
Островский А.М. <i>О находке черепа рыси (Lynx lynx) в Буда-Кошелёвском районе Гомельской области</i> .....	130

# PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2023, № 6 (141) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

## CONTENTS

### BIOLOGY

Bachura Yu.M., Vavilova A.S. <i>Assessment of the influence of algocyanobacterial complexes on the growth and development of winter rye in model experiments</i> .....	5
Halinouski M.G., Potapov D.V. <i>The carabid beetles communities (Coleoptera, Carabidae) in the vicinity of boreholes of the North Domanovich oil field (The Republic of Belarus)</i> .....	11
Karpenko A.F., Antipenko O.N. <i>Sorbent of Cesium-137 produced in Belarus in animal diets</i> .....	17
Kolbas N.Yu. <i>Inhibition of adrenaline autoxidation in vitro with the participation of trolox, ascorbic and gallic acids</i> .....	21
Kontsevaya I.I., Daineko N.M., Timofeev S.F., Medvedskaya T.A. <i>The influence of the «Resoiler» inoculant on the relationships between the main ecological and trophic groups of microorganisms in winter rye crops</i> .....	28
Lazareva M.S., Klimovich L.K. <i>Structure of oak plantations subzones of broad-leaved pine forests</i> .....	34
Makarenko A.I., Moroz M.D. <i>Fauna of leeches (Hirudinea: Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) of small rivers of the Minsk Upland</i> .....	41
Potapenko A.M., Kozlov A.K., Mitin N.V., Tolkacheva N.V., Mashkov I.A. <i>Peculiarities of <sup>137</sup>Cs accumulation in the components of aboveground phytomass of birch plantations in the far zone of Chernobyl fallout under conditions of groundwater level changing</i> .....	45
Sokolov L.V., Sokolova A.A. <i>On the issue of the northern border of the distribution of the small white-toothed shrew (Crocidura suaveolens, Pallas 1811) on the territory of Belarus</i> ...	52
Khramchankova V.M., Matveyenkau M.V. <i>Photoprotective, antioxidant and cytotoxic properties of extracts from two Polyporaceae fungi</i> .....	57
Yarmosh V.G., Zviagintsev V.B. <i>Development of the methodology and assessment of the effectiveness of control of mycoses of woody plants using the stem injection method</i> .....	62

### INFORMATION TECHNOLOGY

Aksionova N.A., Sych D.S., Varuyeu A.V. <i>Method of construction of three-dimensional structures based on key corner points</i> .....	69
Sukach E.I., Konchits A.P., Lukashevich N.S. <i>Simulation modeling of the process of viral infection spread</i> .....	76
Tarasova Yu. A. <i>Analysis of system design and architecture of modern applications</i> .....	81

### MATHEMATICS

Monakhov V.S., Hodanovich D.A. <i>On the class of finite groups factorizable by subnormal supersoluble subgroups</i> .....	86
--	----

---

Nemilostivaya V.A., Malinkovsky Yu.V. <i>Jackson networks with single-line stations and exponential constraints on waiting time for service</i> .....	92
<b>PHYSICS</b>	
Girgel S.S. <i>Vector cartesian Kummer-Gauss beams. I. Uniform polarization. Energy properties</i> .....	98
Dey E.A., Tyumenkov G.Yu. <i>Application of reduced variables in problems of analytical thermodynamics</i> .....	104
Nikitjuk Yu.V., Serdiukov A.N., Aushev I.Yu. <i>Optimization of laser cleaving of silicate glasses with elliptical beams under the additional influence of a hot air flow</i> .....	110
Faniaev I.A., Samofalov A.L., Kravchenko A.Yu., Semchenko I.V., Khakhomov S.A. <i>Metasurface with the function of a transmitting cross-polarizer based on single-turn planar spirals</i> .....	117
<b>ELECTRONICS</b>	
Shershnev E.B. <i>Thermochemical treatment of diamond with a moving laser source</i> .....	123
<b>ABSTRACTS</b>	
Ostrovsky A.M. <i>On the record of a lynx skull (<i>Lynx lynx</i>) in the Buda-Koshelevo district of the Gomel region</i> .....	130

## Оценка влияния альгоцианобактериальных комплексов на рост и развитие озимой ржи в модельных экспериментах

Ю.М. БАЧУРА, А.С. ВАВИЛОВА

Изучено влияние суспензий почвенных микроводорослей родов *Vischeria*, *Chlorella*, цианобактерий рода *Nostoc* и комплексов на их основе на рост и развитие проростков озимой ржи в лабораторных условиях. Показано, что суспензии водорослей и цианобактерий с высокой плотностью клеток обладают большим фитостимулирующим действием. Установлено, что ростостимулирующий эффект комплексов *Nostoc-Vischeria* выше, чем комплексов *Nostoc-Chlorella*; фитоэффекты по длине проростков озимой ржи – больше фитоэффектов по массе.

**Ключевые слова:** водоросли, цианобактерии, фитоэффекты, ячмень, озимая рожь.

The effect of suspensions of soil microalgae of the genera *Vischeria*, *Chlorella*, cyanobacteria of the genus *Nostoc* and complexes based on them on the growth and development of winter rye seedlings in laboratory conditions was studied. It is shown that suspensions of algae and cyanobacteria with high cell density have a great phytostimulating effect. It was found that the growth-stimulating effect of *Nostoc-Vischeria* complexes is higher than that of *Nostoc-Chlorella* complexes; the phytoeffects on the length of winter rye seedlings are greater than the phytoeffects on the mass.

**Keywords:** algae, cyanobacteria, phytoeffects, barley, winter rye.

**Введение.** Водоросли и цианобактерии почв являются ценным и недостаточно изученным возобновляемым ресурсом. Они принимают активное участие во многих процессах, протекающих в почве, способствуют улучшению физико-химических показателей почвы и повышению ее плодородия [1], [2]. Накопление обширного научного и фактического материала способствовало углублению понимания роли почвенно-микробиологических процессов для сельского хозяйства и разработки способов управляемого регулирования взаимодействия высших растений и микроорганизмов в агроэкосистемах. Это обуславливает перспективы для создания полифункциональных альгоцианобактериальных консорциумов, способных вступать во взаимовыгодные отношения с высшими растениями, максимально воспроизводить природные связи агрофитоценозов и реализовывать потенциал почвенных водорослей и цианобактерий в решении проблем повышения продуктивности сельскохозяйственных культур [3], [4]. Целью настоящего исследования являлось изучение влияния альгоцианобактериальных комплексов *Nostoc-Vischeria* и *Nostoc-Chlorella* на рост и развитие проростков озимой ржи в модельных экспериментах.

**Материалы и методика исследований.** Для получения альгоцианобактериальных комплексов (АЦБК) использовали культуры устойчивой к воздействию неблагоприятных факторов водоросли-космополита *Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890, эвритермной водоросли *Vischeria magna* (J.B. Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl 2018 и цианобактерии-азотфиксатора *Nostoc* sp. Vaucher ex Bornet et Flahault, 1886 [5]. Водоросли культивировали на основной среде Болда (Bold basal medium – ВВМ), цианеи – на среде Болда без азота [6]. Определение количества клеток водорослей и цианобактерий проводили в камере Горяева.

В экспериментах использовали комплексы *Nostoc-Vischeria* и *Nostoc-Chlorella* на основе исходных (ИК) и разбавленных (РК) культур данных микроорганизмов и контрольные варианты: 1) опыт I (ИК/РК культура водоросли); 2) опыт II (1 часть (ИК/РК цианобактерии : 3 части (ИК/РК водоросли, 1N:3V; 1N:3Ch); 3) опыт III (1 часть (ИК/РК цианобактерии : 2 части (ИК/РК водоросли, 1N:2V, 1N:2Ch); 4) опыт IV (1 часть (ИК/РК цианобактерии : 1 часть (ИК/РК водоросли, 1N:1V, 1N:1Ch); 5) опыт V (2 части (ИК/РК цианобактерии : 1 часть

(ИК/РК водоросли, 2N:1V, 2N:1Ch); 6) опыт VI (3 части (ИК/РК цианобактерии : 1 часть (ИК/РК водоросли, 3N:1V, 3N:1Ch); 7) опыт VII (ИК/РК цианобактерии); 8) контроль I (ВВМ); 9) контроль II (дистиллированная вода). В качестве тестовой культуры использовали озимую рожь (*Secale cereale* L.) сорта Верасень белорусской селекции [7].

Эксперименты проводили в четырехкратной повторности в стандартных и стрессовых условиях. Для создания стрессовых условий применяли сульфат меди (II) в количестве равном 3 мг/кг и 6 мг/кг субстрата, что соответствует предельно допустимой концентрации подвижных форм меди в почве и превышает предельно допустимую концентрацию в два раза. В ходе эксперимента определяли энергию прорастания и всхожесть семян [8], измеряли морфометрические показатели проростков. Статистическую обработку данных проводили с помощью программ Statistica (Version 10) и Microsoft Excel.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Микроводоросли родов *Vischeria* и *Chlorella*, цианобактерии рода *Nostoc* входят в состав рабочей коллекции культур водорослей, созданной на кафедре ботаники и физиологии растений ГГУ им. Ф. Скорины в рамках Научного гербария Белорусского Полесья (GSU). Плотность суспензии *Chlorella vulgaris* составила 42,7–45,1 млн клеток на 1 мл культуры, *Vischeria magna* – 29,7–29,8 млн клеток на 1 мл культуры, *Nostoc* sp. – 25,6–25,8 млн клеток на 1 мл культуры.

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Vischeria* на основе исходных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 75,0 % до 95,0 %; наибольшие значения показателя отмечены в стандартных условиях. Всхожесть семян находилась в пределах от 80,5 % до 95,0 %; значения показателя в стандартных и стрессовых условиях отличались незначительно. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в опытных вариантах была выше средней длины проростков в контрольных вариантах (рисунок 1). Наибольшая средняя длина проростков выявлена в вариантах опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V и исходной суспензией *Vischeria* (228,30 мм), наименьшая – в контроле с дистиллированной водой (180,48 мм). Средняя масса проростков озимой ржи была наибольшей в вариантах опыта с исходной культурой *Vischeria* и комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:3V (0,26 г и 0,25 г). Наименьшая масса отмечена в варианте опыта с исходной культурой *Nostoc* (0,17 г). С увеличением доли цианобактерии в составе комплекса в стандартных условиях отмечено снижение массы проростков озимой ржи. В стрессовых условиях морфометрические показатели озимой ржи были ниже; сохранилась тенденция превалирования длины и массы проростков в опытных вариантах относительно контрольных вариантов. Повышение содержания ионов меди (II) в субстрате от 3 мг/кг до 6 мг/кг привело к увеличению морфометрических показателей озимой ржи. Наиболее активное развитие проростков при внесении ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата наблюдали в вариантах с исходной суспензией *Vischeria* и комплексом 1N:3V (134,40 мм и 132,83 мм); при содержании ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата – в варианте опыта с исходной культурой водоросли (183,81 мм). Средняя масса проростков озимой ржи в стрессовых условиях была наибольшей в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V при содержании ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата (0,25 г); наименьшей – в контрольных вариантах и в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V при содержании ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата (по 0,13 г).

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Vischeria* на основе разбавленных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 67,5 % до 95,0 %; наибольшие значения отмечены в стрессовых условиях при содержании ионов меди (II) в количестве 3 мг/кг субстрата. Всхожесть семян находилась в пределах от 72,5 % до 97,5 %; наибольшие показатели выявлены в стрессовых условиях при внесении ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в опытных вариантах была выше, чем в контрольных, кроме варианта опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:3V. Максимальные показатели средней длины проростков ячменя отмечены в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* в соотношении 1:1 (245,68 мм); минимальные – в варианте опыта с комплексом 1N:3V (154,35 мм). Максимальная средняя масса проростков озимой ржи выявлена также при использовании комплекса *Nostoc-Vischeria* 1N:1V (0,25 г), минимальная – комплекса 1N:3V (0,15 г). В стрессовых условиях морфометрические показатели озимой ржи были ниже, чем в стандартных условиях; в большинстве опытных вариантов в стрессовых условиях длина и масса проростков были выше, чем в контрольных ва-

риантах. При внесении ионов меди (II) в количестве 3 мг/кг субстрата наиболее активное развитие проростков озимой ржи наблюдали в варианте опыта с комплексом состава 3N:1V (142,33 мм длина и 0,18 г масса), наименее активное – в варианте опыта с разбавленной суспензией *Vischeria* (53,45 мм и 0,12 г соответственно); по длине проростков отмечена тенденция их увеличения при возрастании доли цианобактерии в составе комплекса. При внесении ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата максимальные показатели длины проростков отмечены при применении суспензий *Nostoc* и *Vischeria* (136,18 мм и 134,58 мм соответственно); в вариантах опыта с комплексами *Nostoc-Vischeria* длина проростков была несколько ниже. Масса проростков оказалась наиболее высокой в вариантах с разбавленными суспензиями микроорганизмов и комплексами с преобладанием микроводоросли (0,18–0,19 г).

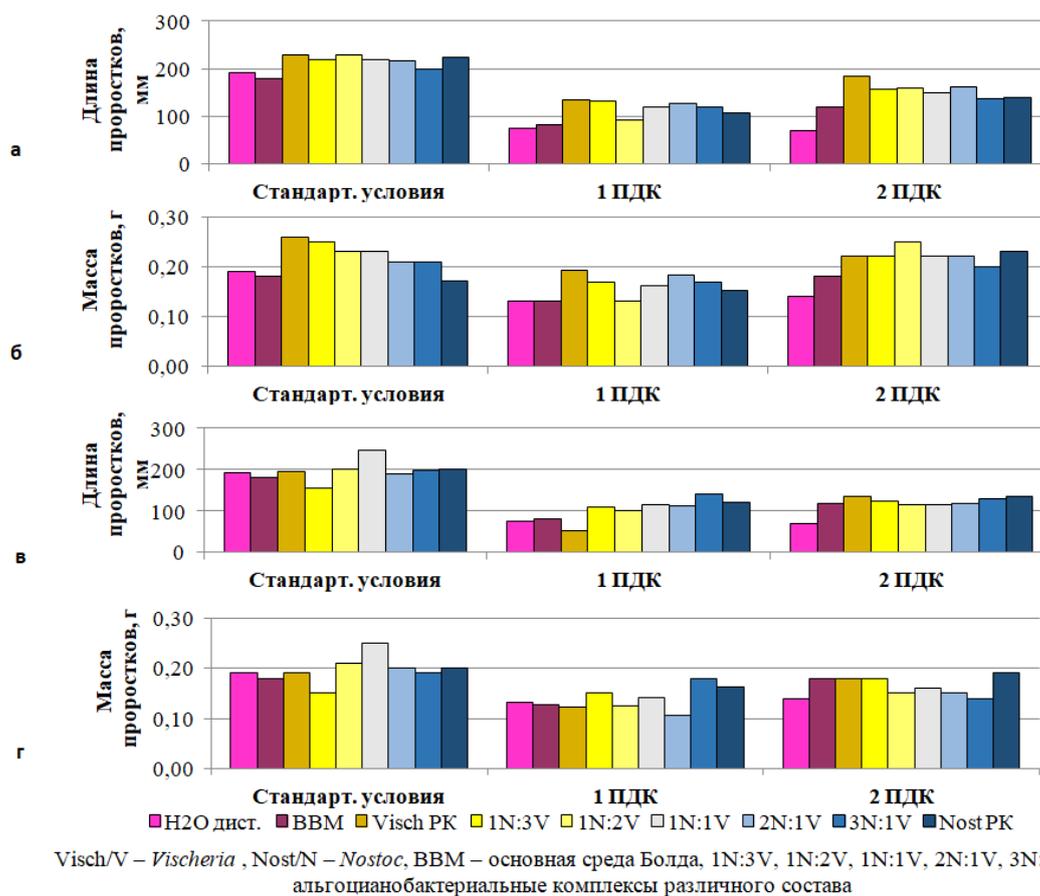


Рисунок 1 – Сравнение длины (а, в) и массы (б, г) проростков озимой ржи, выявленных при использовании АЦБК *Nostoc-Vischeria* на основе исходных (а, б) и разбавленных (в, г) культур микроводорослей и цианобактерий

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Chlorella* на основе исходных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 75,0 % до 95,0 %; наибольшие показатели отмечены при внесении ионов меди (II) в количестве 3 мг/кг субстрата. Всхожесть семян находилась в пределах от 62,5 % до 92,5 %; наибольшие показатели зафиксированы в стандартных условиях. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в вариантах с использованием культур *Chlorella*, *Nostoc* и их комплексов была выше средней длины проростков в обоих контрольных вариантах, за исключением варианта опыта с исходной суспензией водоросли относительно контроля со средой (рисунок 2). Наибольшая средняя длина проростков зафиксирована в варианте опыта с комплексом 2N:1Ch (196,31 мм), значительным показателем был в варианте опыта с использованием исходной суспензии *Nostoc* (185,03 мм). Наименьший показатель средней длины проростков отмечен в контрольном варианте с дистиллированной водой (120,75 мм). Средняя масса проростков озимой ржи была наибольшей в варианте опыта с комплексом 2N:1Ch (0,22 г); наименьшей – в вариантах с дистиллированной водой и комплексом *Nostoc-Chlorella* 1N:1Ch (по 0,13 г).

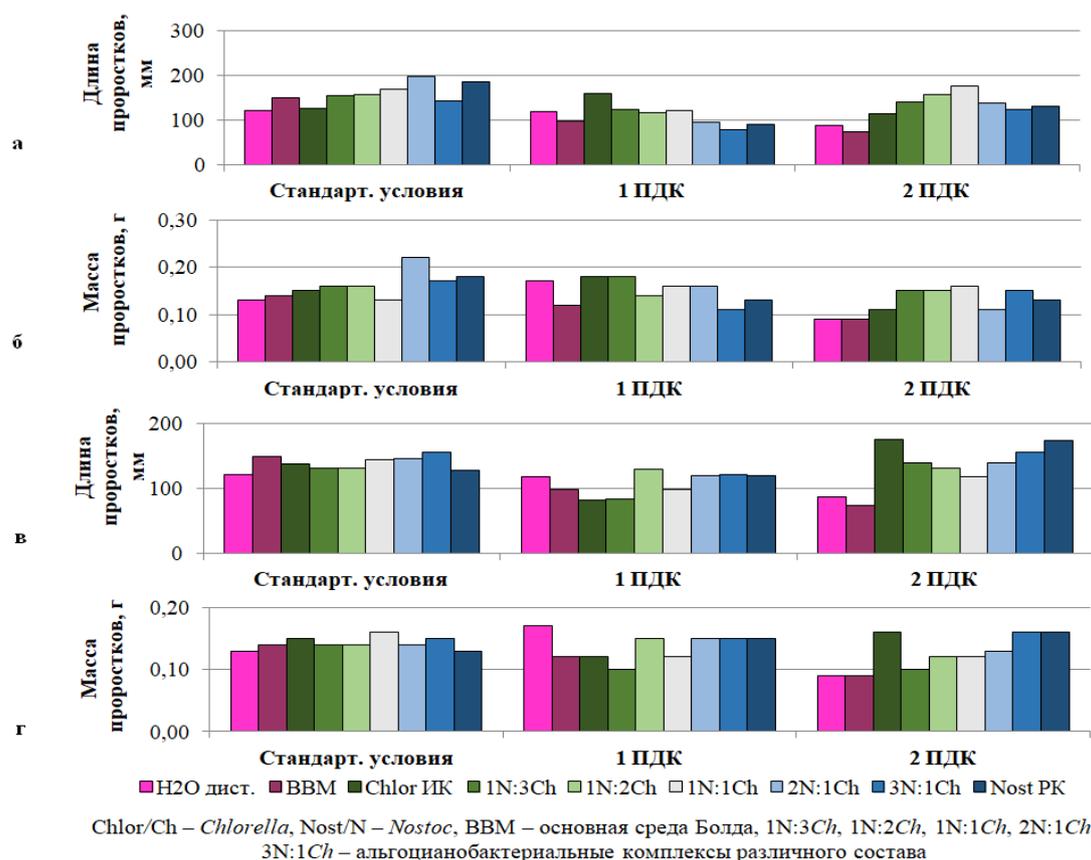


Рисунок 2 – Сравнение длины (а, в) и массы (б, г) проростков озимой ржи, выявленных при использовании АЦБК *Nostoc-Chlorella* на основе исходных (а, б) и разбавленных (в, г) культур микроводорослей и цианобактерий

В стрессовых условиях по сравнению со стандартными длина проростков озимой ржи несколько снизилась; в контрольных вариантах зафиксировано уменьшение длины проростков с увеличением содержания ионов меди (II) в субстрате. При внесении ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата отмечено снижение показателя с возрастанием доли цианобактерии в составе комплекса; при содержании ионов меди 6 мг/кг субстрата выявлено увеличение длины проростков озимой ржи. Наибольшая средняя длина проростков в стрессовых условиях установлена в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Chlorella* 1N:1Ch (176,08 мм), наименьшая – в контроле со средой (72,73 мм) при содержании ионов меди, превышающем предельно допустимую концентрацию в два раза. Средняя масса проростков озимой ржи в стрессовых условиях варьировала от 0,11 г до 0,18 г; наибольшие значения массы получены при содержании ионов меди 3 мг/кг субстрата при использовании исходной культуры *Chlorella* и комплекса *Nostoc-Chlorella* 1N:3Ch (по 0,18 г).

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Chlorella* на основе разбавленных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 65,0 % до 95,0 %; значения показателя в стандартных и стрессовых условиях отличались незначительно. Всхожесть семян находилась в пределах от 62,5 % до 90,0 %; наибольшие показатели отмечены в стандартных условиях. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в опытных вариантах была выше, чем в контроле с дистиллированной водой. Наибольшая средняя длина проростков озимой ржи отмечена при использовании комплекса *Nostoc-Chlorella* 3N:1Ch (155,56 мм), наименьшая – в контроле с дистиллированной водой (120,75 мм). Средняя масса проростков была наибольшей в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Chlorella* 1N:1Ch (0,16 г). Наименьший показатель массы выявлен в вариантах опыта с дистиллированной водой и исходной суспензией ностока (0,13 г). В стрессовых условиях при внесении ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата отмечено снижение средней длины проростков по сравнению со стандартными условиями. Наибольшие значения показателя выявлены в варианте опыта с комплексом состава 1N:2Ch (129,36 мм), наименьшие – в вариантах опыта с разбавленной суспензией хлореллы и комплексом *Nostoc-Chlorella* в соотношении 1:3 (82,13 мм и 82,68 мм соответственно). Средняя масса проростков озимой ржи бы-

ла наибольшей в варианте опыта с дистиллированной водой (0,17 г); в вариантах опыта с комплексами показатель варьировал от 0,10 г до 0,15 г. Наименьший показатель массы выявлен в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Chlorella* в соотношении 1:3 (0,10 г). При увеличении содержания ионов меди до 6 мг/кг субстрата средние показатели длины и массы проростков озимой ржи увеличились; в опытных вариантах длина и масса были выше, чем в контрольных. Наибольшая средняя длина проростков выявлена в вариантах опыта с разбавленными культурами *Nostoc* и *Chlorella* (175,80 мм и 175,33 мм соответственно), наименьшая – в варианте опыта с дистиллированной водой (72,73 мм). Средняя масса проростков озимой ржи была наибольшей в вариантах опыта с разбавленными культурами *Chlorella*, *Nostoc* и комплексом состава 3N:1Ch (0,16 г). Наименьший показатель массы выявлен в вариантах опыта с дистиллированной водой и с основной средой Болда (0,09 г).

Оценка фитостимулирующего действия суспензий водорослей, цианобактерий и их комплексов на длину и массу проростков озимой ржи представлена в таблицах 1, 2. В экспериментах с комплексами *Nostoc-Vischeria* в стандартных условиях максимальная эффективность выявлена при применении комплексов 1N:3V, 1N:2V на основе исходных культур (21–39 %) и 1N:1V на основе разбавленных культур *Nostoc* и *Vischeria* (28–39 %). При использовании комплексов на основе исходных суспензий отмечена тенденция зависимости фитоэффектов по массе проростков озимой ржи от состава комплекса. При содержании ионов меди (II) равном 3 мг/кг субстрата наибольшая эффективность отмечена в вариантах опыта с исходной культурой *Vischeria* и комплексом 3N:1V на основе разбавленных культур; фитоэффекты по длине проростков составили 64–91 %, по массе проростков – 37–50 %. При содержании ионов меди (II) равном 6 мг/кг субстрата максимальные фитоэффекты также отмечены при использовании исходных культур микроорганизмов и их комплексов – по длине проростков в варианте опыта с исходной культурой *Vischeria* (55–165 %), по массе проростков в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V (39–79 %). По массе проростков озимой ржи отмечена общая тенденция снижения фитоэффектов в стрессовых условиях.

Таблица 1 – Фитоэффекты по длине и массе проростков озимой ржи (АЦБК *Nostoc-Vischeria*)

Варианты опыта		Фитоэффекты													
		по отношению к воде дист.							по отношению к ВВМ						
		Visch	1N:3V	1N:2V	1N:1V	2N:1V	3N:1V	Nost	Visch	1N:3V	1N:2V	1N:1V	2N:1V	3N:1V	Nost
длина	ИК станд	19	14	19	15	13	4	17	26	21	27	22	20	10	24
	ИК 1 пдк	80	78	23	60	71	61	43	64	62	12	46	55	47	30
	ИК 2 пдк	165	126	132	117	132	98	101	55	32	35	27	36	16	17
	РК станд	2	-20	5	28	-1	3	4	9	-14	12	36	5	9	11
	РК 1 пдк	-28	48	36	55	51	91	62	-35	35	23	41	37	74	47
	РК 2 пдк	94	77	67	65	69	85	97	13	3	-2	-4	-1	8	15
масса	ИК станд	37	32	21	21	11	11	-11	44	39	28	28	17	17	-6
	ИК 1 пдк	45	27	-1	23	39	28	15	50	31	2	27	44	32	19
	ИК 2 пдк	57	57	79	57	57	43	64	22	22	39	22	22	11	28
	РК станд	0	-21	11	32	5	0	5	6	-17	17	39	11	6	11
	РК 1 пдк	-7	14	-5	8	-19	37	22	-5	18	-2	11	-16	41	26
	РК 2 пдк	29	29	7	14	7	0	36	0	0	-17	-11	-17	-22	6

Примечание –   – 1–20 %,   – 21–50 %   – выше 51 %

Таблица 2 – Фитоэффекты по длине и массе проростков озимой ржи (АЦБК *Nostoc-Chlorella*)

Варианты опыта		Фитоэффекты													
		по отношению к воде дист.							по отношению к ВВМ						
		Chlor	1N:3Ch	1N:2Ch	1N:1Ch	2N:1Ch	3N:1Ch	Nost	Chlor	1N:3Ch	1N:2Ch	1N:1Ch	2N:1Ch	3N:1Ch	Nost
длина	ИК станд	3	27	29	40	63	17	53	-17	3	4	14	32	-5	24
	ИК 1 пдк	34	5	-2	3	-20	-33	-24	62	26	18	24	-4	-20	-8
	ИК 2 пдк	31	63	81	104	59	43	51	56	93	116	142	89	70	79
	РК станд	13	8	8	19	21	29	6	-8	-13	-12	-3	-2	4	-15

Окончание таблицы 2

	РК 1 пдк	-30	-30	10	-17	2	3	1	-16	-15	33	0	22	24	22
	РК 2 пдк	103	60	51	36	60	79	101	141	91	80	61	90	113	139
масса	ИК станд	15	23	23	0	69	31	38	7	14	14	-7	57	21	29
	ИК 1 пдк	6	6	-18	-6	-6	-35	-24	50	50	17	33	33	-8	8
	ИК 2 пдк	22	67	67	78	22	67	44	22	67	67	78	22	67	44
	РК станд	15	8	8	23	8	15	0	7	0	0	14	0	7	-7
	РК 1 пдк	-29	-41	-12	-29	-12	-12	-12	0	-17	25	0	25	25	25
	РК 2 пдк	78	11	33	33	44	78	78	78	11	33	33	44	78	78
Примечание –		■ – 1–20 %,			■ – 21–50 %			■ – выше 51 %							

При применении комплексов *Nostoc-Chlorella* в стандартных условиях максимальная эффективность выявлена в вариантах опыта с комплексами 2N:1Ch на основе культур с высокой плотностью клеток – фитоэффекты по длине проростков составили 32–63 %, по массе проростков – 57–69 %. При содержании ионов меди (II) равном 3 мг/кг субстрата наибольшая эффективность отмечена в вариантах опыта с исходной культурой *Chlorella* и комплексом состава 1N:2E на основе разбавленных культур *Nostoc* и *Chlorella*; фитоэффекты по длине проростков составили 10–62 %, по массе проростков – 6–50 %. При содержании ионов меди (II) равном 6 мг/кг субстрата максимальные фитоэффекты получены при использовании разбавленных суспензий ностока и хлореллы и комплекса *Nostoc-Chlorella* в соотношении 1:1 на основе исходных культур микроорганизмов – фитоэффекты составили 78–142 %.

**Закключение.** В ходе проведенных лабораторных экспериментов выполнена оценка влияния суспензий почвенных микроводорослей родов *Vischeria*, *Chlorella*, цианобактерий рода *Nostoc* и комплексов на их основе на рост и развитие проростков озимой ржи. Наибольшее фитостимулирующее действие на озимую рожь в стандартных и стрессовых условиях оказали альгоцианобактериальные комплексы на основе культур микроводорослей и цианобактерий с высокой плотностью клеток. Ростостимулирующий эффект комплексов *Nostoc-Vischeria* был выше, чем комплексов *Nostoc-Chlorella*; фитоэффекты по длине проростков озимой ржи – больше фитоэффектов по массе.

Результаты исследования могут быть использованы в области сельского хозяйства и биотехнологии при изучении биотехнологического потенциала микроводорослей и цианобактерий перспективных для использования в качестве биоудобрений и/или для получения стимуляторов роста высших растений.

Работа выполнена в рамках задания «Разработка альгоцианобактериальных комплексов для использования в качестве стимуляторов роста при возделывании озимой ржи и ячменя» (№ ГР 20211709) ГПНИ «Биотехнологии-2».

## Литература

1. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) [Электронный ресурс] / С. В. Дидович [и др.] // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 2 (14). – Режим доступа : <http://algology.ru/1170>. – Дата доступа : 19.07.2023.
2. Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс : обзор / Г. С. Минюк [и др.] // Морской экологический журнал. – 2008. – № 7. – С. 5–23.
3. Лукьянов, В. А. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе / В. А. Лукьянов, А. И. Стифеев. – Курск : КГСХА, 2014. – 181 с.
4. Михеева, Т. М. Перспективы использования культивируемых и планктонных микроскопических водорослей / Т. М. Михеева // Наука и инновации. – 2018. – № 2 (180). – С. 15–19.
5. The on-line database of cyanobacterial genera [Electronic resource] / J. Komárek, T. Hauer. – Mode of access : <http://www.cyanodb.cz>. – Date of access : 24.01.2023.
6. Гайсина, Л. А. Современные методы выделения и культивирования водорослей : учебное пособие / Л. А. Гайсина, А. И. Фазлутдинова, Р. Р. Кабиров. – Уфа : БГПУ, 2008. – 152 с.
7. Государственный реестр сортов /отв. за вып. В. А. Бейня. – Минск, 2020. – 270 с.
8. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038-84. – Введ. 01.01.2002. – М. : Изд-во станд., 2001. – 30 с.

## Сообщества жужелиц (Coleoptera, Carabidae) в окрестностях скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения (Республика Беларусь)

Н.Г. ГАЛИНОВСКИЙ, Д.В. ПОТАПОВ

В статье рассматриваются особенности формирования сообществ жужелиц, обитающих вблизи нефтяных скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения Гомельской области (Республика Беларусь), которое расположено в лесном массиве. Исследования были проведены на трех стационарах (2 скважины с различной удаленностью от границы леса и контрольном – в глубине смешанного леса). Было выявлено, что в сообществах нефтяного месторождения обитает 19 видов жужелиц из 10 родов, среди которых видовым богатством выделялись роды *Harpalus*, *Calathus* и *Carabus*. Было зафиксировано статистически достоверное сокращение численности луговых и полевых видов на участке с широкой полосой переходной зоны с травянистой растительностью (эктоном), которое ограничило их проникновение в лесную экосистему. Выявлено, что сообщества жужелиц окрестностей скважин в лесных экосистемах состоят преимущественно из мезофилов и мезоксерофилов крупных и средних размеров, предпочитающих как лесные, так и открытые местообитания.

**Ключевые слова:** жесткокрылые, жужелицы, нефтяные скважины, сообщества, доминирование, экологическая структура.

The article describes the peculiarities of the carabid beetles communities formation living in the vicinity of boreholes of the North Domanovich oil field in the Gomel region (The Republic of Belarus) located in the forest. The research was carried out in three areas (two areas with different distances from the forest boundary and the control area being deep in the mixed forest). It was revealed that 19 species of carabid beetles from 10 genera lived in the communities of the oil field, among which the genera *Harpalus*, *Calathus* and *Carabus* stood out for their species richness. Statistically significant reduction of meadow and field species has been recorded in the area with wide transition zone with grassy vegetation (ecotone), limiting their penetration into the forest ecosystem. It was found that carabid beetles communities of vicinity of boreholes of the forest ecosystems mainly consisted of large and medium sized mesophiles and mesoxerophiles, which preferred both forest and open habitats.

**Keywords:** beetles, carabids, oil wells, communities, domination, ecological structure.

Республика Беларусь является одной из нефтедобывающих стран мира и ее разведанные запасы нефти составляют около 50 млн. тонн, открыто более 80 нефтяных месторождений, из которых активно разрабатывается более двух третей. При этом разработка ведется как в условиях луговых экосистем и сельскохозяйственных угодий, так и в лесных массивах с предварительной вырубкой деревьев.

Не только нефть и ее производные могут отрицательно воздействовать на окружающие район нефтедобычи экосистемы путем изменения ее структуры, но и сама нефтедобыча, а также работы по организации и установке оборудования нефтескважин оказывает влияние на среду обитания зооценозов экосистем [1]–[2].

Оценка влияния обустройства нефтескважин в лесных экосистемах Беларуси еще недостаточна, так как проводимые исследования на эту тему единичны [3]–[5], в связи с чем подобные изыскания очень актуальны и будут иметь высокую степень новизны и большое практическое значение для разработки мероприятий по снижению негативного воздействия процессов нефтедобычи на биоту.

Целью нашего исследования являлось изучение состояния сообществ жужелиц лесных экосистем, приуроченных к нефтяным скважинам Северо-Домановичского нефтяного месторождения.

**Материал и методика.** Для достижения поставленной цели на Северо-Домановичском нефтяном месторождении (Калинковичский район Гомельской области, Республика Беларусь) в апреле–сентябре были осуществлены исследования на стационарах, заложенных в 2023 г.:

**1. Стационар «Скважина № 4».** Расположен у края зоны отчуждения скважины № 4 Северо-Домановичского нефтяного месторождения. Непосредственно примыкает к границе

лесного массива (сосняк мшистый с отсутствием подлеска). В непосредственном приближении к зоне отчуждения на глубину 50 метров проводится санитарная рубка. Склон зоны отчуждения по направлению к лесному массиву полностью покрыт злаковой растительностью (мятлик, тимофеевка, ежа сборная). Почвы супесчаные.

**2. Стационар «Скважина № 53».** Расположен у края зоны отчуждения скважины № 53 Северо-Домановичского нефтяного месторождения. Представляет собой экотон шириной порядка ста метров между зоной обустройства нефтескважины и прилегающим к ней лесным массивом. Почва песчаная, растительность – злаковое разнотравье, ослинник с примесью 3–5 летних сосен (проективное покрытие растительности неоднородно, у края зоны отчуждения составляет 5–10 %, далее по мере продвижения к опушке лесного массива и увеличению плотности молодой поросли сосны она увеличивается до 50 %).

**3. Контрольный стационар.** Расположен в лесном массиве, не подверженном трансформации со стороны человека в пределах Северо-Домановичского нефтяного месторождения. Представляет собой участок сосняка черничника с формулой 5СЗБ2Р. Подстилка слабо сформирована, представлена преимущественно хвойно-лиственным опадом.

Стационары расположены в нескольких километрах к югу от городского поселка Озаричи Калининского района.

Учет жуелиц проводился при помощи почвенных ловушек (полистироловые стаканы объёмом 0,5 л на одну треть заполненные формалином). Ловушки выставлялись из расчета 20 ловушек на один стационар. Замена ловушек проводилась ежемесячно. При этом на участках с нефтяными скважинами ловушки выставлялись в линию по мере удаления от края отчуждения скважины. Всего было обработано 9000 ловушко-суток на трех стационарах.

Первичная база жуелиц, включающая в себя данные о таксономической принадлежности, биопререферендуме, гигропререферендуме, жизненной форме и численности составлялась с использованием электронных таблиц Libre Office Calc 7.6 (<https://www.libreoffice.org>). Для анализа распределений, средних, ошибок и верификации гипотез об их различиях и связях использовался программный статистический пакет PAST 4.13 (<https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/past/>). Расчет показателей  $\alpha$ -разнообразия в сообществах проводился с использованием программного пакета BioDiversity Pro (<https://www.sams.ac.uk/science/outputs>). Расчет индекса разнообразия Шеннона, моделей распределения проводился с использованием натурального основания логарифма. Доминирование в сообществах определялось по шкале Ренконена [6].

**Результаты и обсуждение.** Всего за время исследований было выявлено 284 особи жуелиц, относящихся к 19 видам из 10 родов (таблица 1). Наиболее высоким видовым богатством выделялись роды *Calathus* и *Harpalus* (по 4 вида в каждом), а также *Carabus* (3 вида). В остальных родах было отмечено представительство по 1–2 видам (таблица 1).

Таблица 1 – Видовой состав и степень доминирования (%) жуелиц в сообществах окрестностей скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения

Вид	Скважина		Контроль
	№4	№53	
1	2	3	4
<i>Amara aenea</i> (De Geer, 1774)	5,5	0,9	5,0
<i>Amara communis</i> (Panzer, 1797)	1,8	0,9	3,3
<i>Brosicus cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	0	3,5	0
<i>Calathus erratus</i> (Sahlberg, 1827)	33,1	13,8	0
<i>Calathus fuscipes</i> (Goeze, 1777)	10,1	8,7	0
<i>Calathus melanocephalus</i> (Linnaeus, 1758)	0	4,4	0
<i>Calathus micropterus</i> (Duftschmid, 1812)	27,6	0	13,3
<i>Carabus glabratus</i> Paykull, 1790	7,3	0,9	41,7
<i>Carabus hortensis</i> Linnaeus, 1758	0	3,5	11,7
<i>Carabus nitens</i> Linnaeus, 1758	0	0,9	0
<i>Cicindela sylvatica</i> Linnaeus, 1758	0	0,9	0
<i>Cychrus caraboides</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	10,0
<i>Harpalus flavescens</i> (Piller et Mitterpacher, 1783)	1,8	20,8	0

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
<i>Harpalus rubripes</i> (Duftschmid, 1812)	9,2	23,4	8,3
<i>Harpalus rufipes</i> (De Geer, 1774)	0,9	12,2	0
<i>Harpalus tardus</i> (Panzer, 1797)	1,8	1,7	0
<i>Panagaeus bipustulatus</i> (Fabricius, 1775)	0	0	1,7
<i>Poecilus versicolor</i> (Sturm, 1824)	0,9	3,5	1,7
<i>Pterostichus oblongopunctatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	3,3
<b>Всего экземпляров</b>	<b>109</b>	<b>115</b>	<b>60</b>
<b>Всего видов</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>10</b>
<b>Информационное разнообразие, H'</b>	<b>1,83</b>	<b>2,17</b>	<b>1,83</b>
<b>Концентрация доминирования, C</b>	<b>0,21</b>	<b>0,14</b>	<b>0,21</b>
<b>Выравненность по Пилелу, e</b>	<b>0,76</b>	<b>0,80</b>	<b>0,79</b>

В результате сборов было выявлено, что наибольшее видовое богатство жуужелиц характерно для скважины, которая имела примыкающую к краю зоны отчуждения широкую полосу экотона (таблица 1). Лесная стация, примыкающая напрямую к скважине, а также контрольный участок леса имели практически одинаковое видовое богатство в сообществах жуужелиц (11 и 10 видов соответственно). Численность жуужелиц в значительной степени варьировало. Так, наибольшее количество особей было зафиксировано опять же в сообществе на экотоне (таблица 1). Несколько меньше – в лесной стации, примыкающей непосредственно к скважине № 4, а на контрольном участке наблюдалась наименьшая численность представителей этой группы жесткокрылых.

При анализе видового сходства исследованных стационаров было обнаружено, что наиболее высокий показатель коэффициента Жаккара (0,63) был характерен для сообществ около нефтяных скважин, в то время как видовой состав жуужелиц контрольного участка в значительной мере отличался от такового как сообщества скважины № 4 ( $K_g = 0,40$ ), так и скважины № 53 ( $K_g = 0,3$ ). В то же время при проведении однофакторного дисперсионного анализа для оценки зависимости численности жуужелиц в сообществе от места обитания не было выявлено статистически достоверного влияния ( $\chi^2$  Краскела-Уоллиса составил всего 1,895 при  $p = 0,367$ ) – рисунок 1.

При анализе структуры доминирования в исследованных сообществах в качестве общего доминанта был выявлен типичный представитель открытых пространств *Harpalus rubripes* (таблица 1). При этом следует сказать, что наивысшее обилие как доминант он имел на стационаре с экотонем вблизи скважины № 53, а в чисто лесных стациях его обилие было практически одинаковым (за небольшим преобладанием на участке, где лесной массив примыкал к скважине). Что же касается количества доминантов, то численно их количество на исследованных стационарах мало отличалось, но видовая специфичность преобладавших видов в достаточной степени варьировала. Так, в сообществе с непосредственным примыканием лесного массива было выявлено ещё 5 видов – доминантов: *A. aenea*, *C. erratus*, *C. fuscipes*, *C. micropterus* и *C. glabratus*. При этом следует отметить, что 3 вида из 6 видов доминантов: *A. aenea*, *C. micropterus* и *C. glabratus* преобладало на всех лесных стационарах, кроме сообщества экотона, а *C. erratus* и *C. fuscipes* были зафиксированы только около скважин и отсутствовали в сообществе на контрольном участке.

На участке экотона рядом со скважиной № 53, кроме доминировавшего на всех участках *H. rubripes* преобладало ещё 4 вида: *C. erratus*, *C. fuscipes*, *H. rufipes* и *H. flavescens* (таблица 1). Особо следует отметить последние два вида, численность которых очень высока именно в условиях экотона, где присутствует обширная площадь открытых песчаных пространств.

На контрольном участке наряду с двумя видами, тяготеющими к открытым пространствам, *A. aenea* и *H. rubripes* доминировали и чисто лесные виды *C. micropterus*, *C. glabratus*, *C. hortensis* и *C. caraboides* (таблица 1).

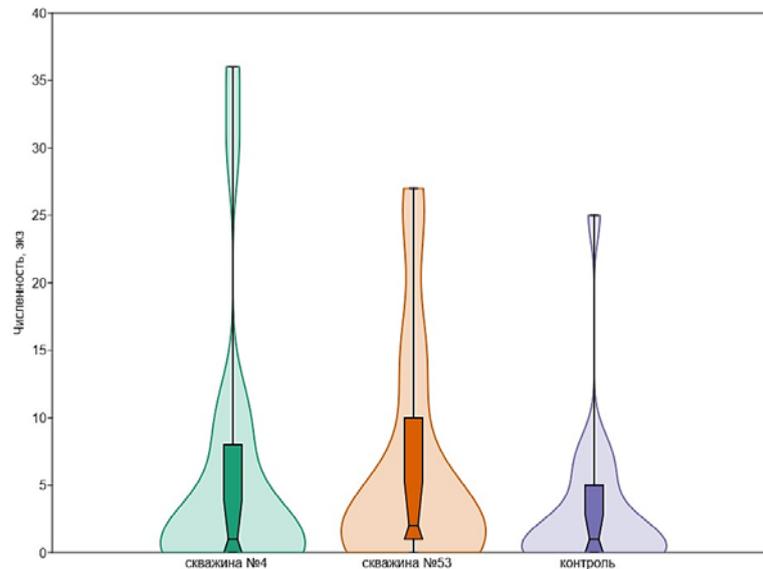


Рисунок 1 – Результаты дисперсионного анализа влияния условий обитания на численность жужелиц

При анализе возможных изменений численности жужелиц при удалении от края зоны отчуждения скважин какого-либо значительного ее уменьшения на участке лесного массива, непосредственно примыкавшего к скважине № 4 не наблюдалось. В то же время на стационаре с экотонном присутствовала отрицательная корреляционная зависимость (рисунок 2) при продвижении от края зоны отчуждения по направлению к лесу ( $r_{sp} = -0,55$ ;  $p = 0,01$ ). Высокую численность жужелиц вблизи зоны отчуждения можно объяснить широким присутствием видов, обычных в открытых экосистемах (наряду с доминантами это и *B. cephalotes*, *P. versicolor*, *C. melanocephalus*), количество особей которых позволяло причислить их к субдоминантам (таблица 1).

Параметры альфа разнообразия также свидетельствуют о наиболее высоком информационном разнообразии в сообществе жужелиц на экотоне вблизи скважины № 53, а наиболее высокая выравненность в экотоне при наименьшей концентрации доминирования свидетельствует о большом разнообразии экологических ниш в данном местообитании, что позволяет избежать прямой конкуренции (таблица 1).

Эти особенности сообщества жужелиц экотона хорошо согласуются с моделью разломанного стержня Макарута, для которой характерно деление пространства ниш на случайные, соприкасающиеся, но неперекрывающиеся участки (рисунок 3).

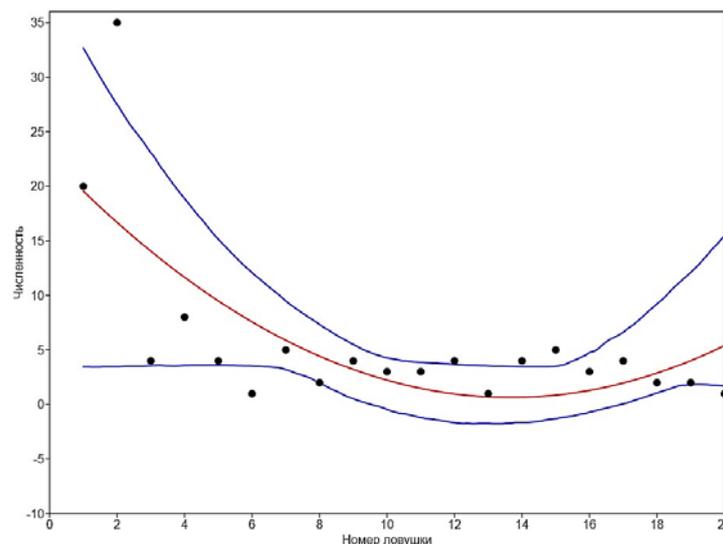


Рисунок 2 – Колебания численности жужелиц по мере удаленности от края зоны отчуждения нефтескважины № 53 Северо-Домановичского нефтяного месторождения

Распределение видов в сообществах жужелиц как вблизи скважины № 4, так и контрольного участка с большей вероятности можно описать моделью логарифмически нормального распределения, что говорит о достаточно схожей устоявшейся структуре лесных экосистем этих двух стационаров (рисунок 3).

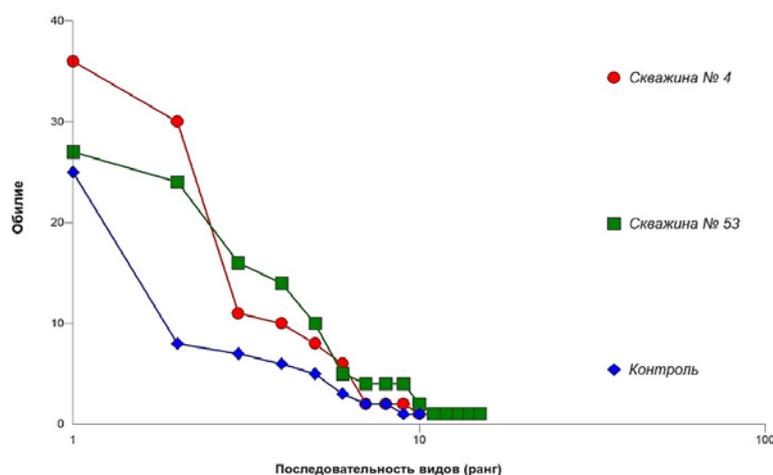


Рисунок 3 – Ранжирование видов в исследованных сообществах жужелиц

Оценивая особенности экологической структуры, можно выделить высокое присутствие как по видовому богатству, так и по численности полевых видов в сообществе экотона вблизи скважины № 53 и в лесном массиве вблизи скважины № 4 (таблица 2). В то же время на контрольном участке наблюдалось резкое их сокращение в пользу лесных видов, особенно по численности. Следует отметить также высокое видовое богатство и численность мезофилов на всех исследованных участках и особенно в сообществе контрольного лесного массива, где по численности они составляли 3/4 от всех коллектированных особей жужелиц. Доля тяготеющих к более сухим местообитаниям мезоксерофилов также достаточно велика, особенно на стационарах, примыкающих к нефтяным скважинам, и в меньшей степени – на контрольном участке (таблица 2).

Таблица 2 – Экологические группы жужелиц в сообществах окрестностей скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения

Экологическая группа, виды	Скважина				Контроль	
	№ 4		№ 53		S	N
	S	N	S	N		
<b>Биопреферendum</b>						
лесные	2	34,9	2	4,3	4	76,7
луговые	2	11,9	3	10,4	3	8,3
полевые	7	53,2	10	85,3	3	15,0
<b>Гигропреферendum</b>						
ксерофилы	1	5,5	3	5,2	1	5,0
мезоксерофилы	4	45,9	4	60,0	2	10,0
мезофилы	6	48,6	8	34,8	7	85,0
<b>Жизненная форма</b>						
геохортобионты гарпалоидные	6	21,2	6	60,0	3	16,7
стратобионты скважиники поверхностно-подстилочные	0	0	0	0	1	1,7
стратобионты скважиники подстилочные	3	70,6	3	26,9	1	13,3
стратобионты зарывающиеся бегающе-роющие	0	0	1	3,5	0	0
стратобионты зарывающиеся подстильно-почвенные	1	0,9	1	3,5	2	5,0
эпигеобионты летающие	0	0	1	0,9	0	0
эпигеобионты ходящие	1	7,3	3	5,2	3	63,3
<i>Всего видов</i>	<i>11</i>		<i>15</i>		<i>10</i>	
<i>Всего особей</i>	<i>109</i>		<i>115</i>		<i>60</i>	
<i>Примечание: S – количество видов, N – относительное обилие особей, %.</i>						

Спектр жизненных форм также неоднозначен и варьирует в зависимости от места обитания. Так на контрольном участке по видовому богатству и численности преобладали крупные эпигеобионты ходящие и в значительно меньшей степени средних размеров геохортобионты гарпалоидные и стратобинты скважинки подстилочные, а на стационарах, примыкающих к зоне отчуждения нефтескважин, преобладали в значительной степени упомянутые выше среднего размера жужелицы (таблица 2). При этом в зоне экотона массово отмечались геохортобионты гарпалоидные, а в лесном массиве около скважины № 4, наоборот, стратобинты скважинки подстилочные.

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенных исследований было выявлено, что:

1. Лесные сообщества жужелиц, непосредственно прилегающих к зоне отчуждения нефтяных скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения, представлены 16 видами из 6 родов, среди которых выделялись роды *Harpalus* (4 вида), а также *Calathus* и *Carabus* (по 3 вида в каждом).

2. Условия обитания жужелиц около исследованных нефтескважин статистически достоверно не влияют на численность жужелиц в окрестностях нефтескважин.

3. Видовой состав сообществ жужелиц вблизи нефтескважин значительно отличается от такового в лесном массиве, не подвергшемся трансформации.

4. В месте прямого прилегания песчаной зоны отчуждения к краю леса в виде экотона наблюдается незначительная перестройка видового состава и достоверное уменьшение численности жужелиц по направлению к границе лесного массива.

5. В сообществе экотона скважины распределение видов было наиболее характерным для биоценоза с высокой выравненностью и содержанием незанятых экологических ниш, в отличие от остальных исследованных сообществ, которые характеризовались условиями слабо нарушенного сообщества.

6. Сообщества жужелиц окрестностей скважин Северо-Домановичского нефтяного месторождения в своем большинстве состоят из мезофилов и мезоксерофилов, видов среднего и крупного размера, предпочитающих как открытые станции, так и местообитания с древесной растительностью с неплотной почвой, которая обладает большим количеством скважин и трещин для жизнедеятельности жуков.

Таким образом, можно сказать, что наличие широкой зоны экотона нивелировало неблагоприятное антропогенное влияние на лесные виды жужелиц, выраженное ростом лугополевых видов в лесной экосистеме.

## Литература

1. Шамраев, А. В. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды / А. В. Шамраев, Т. С. Шорина // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6 (100). – С. 642–645.
2. Хабилов, И. К. Устойчивость почвенных процессов / И. К. Хабилов, И. М. Габбасова, Ф. Х. Хазиев. – Уфа : БГАУ, 2001. – 327 с.
3. Галиновский, Н. Г. Сообщества герпетобионтных жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) в окрестностях скважин Южно-Осташковского нефтяного месторождения (Республика Беларусь) / Н. Г. Галиновский, О. М. Демиденко, Д. В. Потапов, В. С. Аверин // Известия ГГУ. – 2020. – № 3. – С. 22–29.
4. Halinowski, M. Ground beetle communities found in the suburbs of oil wells of oil fields in Khoyniki district (Republic of Belarus) / M. Halinowski, D. Potapov, V. Averin, O. Demidenko // Baltic coastal Zone. – 2022. – Vol. 25. – P. 61–69.
5. Галиновский, Н. Г. Карабидокомплексы (Coleoptera, Carabidae) в окрестностях скважин Южно-Осташковского нефтяного месторождения (Республика Беларусь) / Н. Г. Галиновский, О. М. Демиденко, Д. В. Потапов, В. С. Аверин // Известия ГГУ. – 2022. – № 3. – С. 5–11.
6. Renkonen, O. Statistish-Okologiske Untersuchungen uber die terrestrische Kaferwelt der finnischen Bruchmoore / O. Renkonen // Ann. Zool. – Bot. Soc. Fennicae. – 1938. – № 6. – P. 1–30.

## Сорбент цезия-137 белорусского производства в рационах животных

А.Ф. КАРПЕНКО<sup>1</sup>, О.Н. АНТИПЕНКО<sup>1,2</sup>

Анализируются результаты исследований радиологической эффективности, физиологического состояния и качества получаемой животноводческой продукции при использовании углеродного ферроцинсодержащего сорбента (УФС) белорусского производства в составе рационов сельскохозяйственных животных, содержащихся на территории радиоактивного загрязнения. Установлено, что УФС можно использовать в качестве добавки в составе рационов для снижения накопления <sup>137</sup>Cs в организме сельскохозяйственных животных: для кроликов в дозах 2 и 4 г/голову, бычков на откорме, лактирующих коров и лошадей в дозе 40 г/голову. Сорбент не оказывает отрицательного влияния на потребление кормов, прирост живой массы, молочную продуктивность и физиологическое состояние животных.

**Ключевые слова:** сорбенты, ферроцин, <sup>137</sup>Cs, сельскохозяйственные животные.

The results of the studies on the radiological efficiency, physiological state and quality of the resulting livestock products using carbon&ferrocene containing sorbent (CFCS) of Belarusian production as part of the diets of farm animals kept in the territory of radioactive contamination are analyzed. It has been established that CFCS can be used as an additive in diets to reduce the accumulation of <sup>137</sup>Cs in the body of farm animals: the doses are 2 and 4 g/head for rabbits and 40 g/head for fattening bulls, lactating cows and horses. The sorbent does not have a negative effect on feed consumption, live weight gain, milk production and the physiological state of animals.

**Keywords:** sorbents, ferrocene, <sup>137</sup>Cs, farm animals.

**Введение.** После аварии на Чернобыльской АЭС, когда обширные территории загрязнились долгоживущими изотопами цезия-137 и стронция-90, в Беларуси возникла одна из острейших проблем в сельскохозяйственном производстве – получение на этих территориях сельскохозяйственной продукции с содержанием радионуклидов не выше республиканских допустимых уровней (РДУ-99) [1]. Данная проблема существует и в настоящее время [2], [3].

Одним из направлений получения сельскохозяйственной продукции в рамках РДУ-99 является использование в кормлении животных энтеросорбента ферроцина, связывающего и выводящего из желудочно-кишечного тракта эндогенный и экзогенный цезий-137 [4], [5]. В этой связи на протяжении послеаварийных лет в комплексе защитных мероприятий в сельскохозяйственном производстве предусматривалось обеспечение ферроцинсодержащим комбикормом молочного скота личных подсобных хозяйств в тех населенных пунктах, где по данным радиационного контроля санитарного надзора отмечается производство молока с превышением РДУ-99 по содержанию цезия-137 [6]. Так, например, в течение пятилетнего периода 2016–2020 гг. требовалось производить около 0,1 тыс. т ферроцинсодержащего комбикорма ежегодно. Для его изготовления, при установленной норме ввода сорбента 6 кг на 1 т комбикорма, потребность в ферроцине на год составляет около 600 кг. При приобретении по цене 50 долларов США за 1 кг у единственного производителя данного препарата ООО НПП «Эксорб» Российской Федерации необходимо изыскивать бюджетные средства в сумме эквивалентной 30 тысячам долларов США. На этом основании возникли вопросы производства собственных сорбентов в Республике Беларусь, чтобы не только удовлетворить внутренние потребности и решить вопросы импортозамещения, но даже выйти в перспективе на их экспорт.

В Институте природопользования НАН Беларуси в период 1987–1990 гг. были проведены исследования по получению сорбционных материалов, избирательных по отношению к цезию-137, на основе гексацианоферратов меди, цинка, кобальта, железа, введенных в поры активированного угля. В результате был получен углеродный ферроцинсодержащий сорбент (УФС), представляющий собой композиционный материал на основе торфяного активированного угля и пятипроцентного ферроцина [8]. После лабораторных исследований сорбционных свойств химическим методом, а также на лабораторных животных, получавших цезий-137 в составе корма, было установлено, что УФС показал результаты намного лучше, чем исходный

ферроцин. После получения положительных результатов в лабораторных условиях необходимое количество УФС было подготовлено и передано в ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси» для проведения испытаний на экспериментальных сельскохозяйственных животных, получающих в составе кормов цезий-137, а также находящихся на загрязненной данным радионуклидом территории. Одновременно с этим Институтом природопользования НАН Беларуси были подготовлены технические условия для промышленного выпуска УФС.

Цель исследований заключалась в изучении радиологической эффективности, физиологического состояния и качества получаемой животноводческой продукции при использовании УФС белорусского производства в составе рационов сельскохозяйственных животных, содержащихся на территории радиоактивного загрязнения.

**Материал и методы исследований.** Объектами исследований являлись кролики, коровы и бычки черно-пестрой породы, лошади. Методы исследований – зоотехнический, физиологический, биохимический, радиометрический, статистический, анализа и синтеза, и другие.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В первом опыте использовали УФС в рационах кроликов. Для этого на базе вивария Института радиобиологии НАН Беларуси были сформированы 4 группы кроликов-самцов трехмесячного возраста породы белый паннон (контрольная и 3 опытных) численностью 3 головы в каждой (таблица 1). Продолжительность опыта 30 дней [9].

Таблица 1 – Схема постановки опыта на кроликах по методу пар-аналогов

Группы	Кол-во животных, гол.	Живая масса на начало опыта, кг	Особенности кормления
Контрольная	3	1,8–2,3	Сено, комбикорм – основной рацион (ОР)
1 опытная	3	1,8–2,3	ОР + 0,2 г ферроцина
2 опытная	3	1,8–2,3	ОР + 2 г УФС
3 опытная	3	1,8–2,3	ОР + 4 г УФС

Контрольная и опытные группы животных во время опыта получали в составе основного рациона сено злаково-бобовое (0,06 кг на голову в сутки с удельной активностью цезия-137 5500–6400 Бк/кг) и комбикорм-концентрат КК-92 для взрослых кроликов (ТУ РБ 600024008.125-2006) (0,15 кг на голову в сутки). Ферроцин и УФС вводились в состав комбикорма.

В результате радиометрических измерений было установлено, что параметры перехода цезия-137 в звене миграции рацион/мышечная ткань в контрольной группе составили 138,6 %, в 1-й группе – 43,5 %, 2-й группе – 30,8 % и 3-й группе – 16,8 %, что соответственно на 95,1, 107,8 и 121,8 % меньше в сравнении с контролем (таблица 2).

Таблица 2 – Показатели удельного содержания цезия-137 в мышечной ткани и его поступления из рациона кроликов

Группа	Средняя удельная активность мышечной ткани, Бк/кг	Кратность снижения по сравнению с контрольной группой	Переход в звене рацион-мышечная ткань, %
Контрольная	501,00 ± 226,3	-	138,6
1 опытная	157,33 ± 45,0	3,18	43,5
2 опытная	111,47 ± 44,3	4,49	30,8
3 опытная	60,87 ± 16,2	8,23	16,8

При потреблении в питании 1 кг кроличьего мяса ожидаемая доза внутреннего облучения, рассчитанная с использованием размерного пересчетного коэффициента равного  $1,3 \times 10^{-8}$  Зв/Бк, может составлять в контрольной группе 6,5 мкЗв, в 1-й группе 2,05 мкЗв, 2-й группе 1,45 мкЗв и 3-й группе 0,79 мкЗв [10].

Второй научно-производственный опыт проводился на базе сельскохозяйственного предприятия ОАО «Маложинский» Брагинского района, где были сформированы 1 контрольная и 2 опытные группы бычков черно-пестрой породы 18–20-ти месячного возраста, численностью по 5 голов в каждой. Первая опытная группа получала 40 г/голову УФС, вторая – 3 г/голову ферроцин. На 35-е сутки был произведен убой животных и получены фактические значения содержания цезия-137 в мышечной ткани бычков. Как видно на рисунке они составили в контрольной группе  $125,3 \pm 1,3$  Бк/кг; 1-й опытной –  $25,0 \pm 5,7$  Бк/кг; 2-й опытной –  $28,7 \pm 5,2$  Бк/кг.



Рисунок 1 – Содержание цезия-137 в мышечной ткани бычков, Бк/кг

Кратность снижения поступления цезия-137 в организм бычков в сравнении с контролем составила в 1-й группе – 5,0 раз; 2-й – 4,4 раза. Исследования органолептических показателей и содержание техногенных токсикантов (Pb, Cd, Hg, As) в мясе опытных групп не различались по отношению к контролю.

Третий научно-производственный опыт проводился в ОАО «Ветковский агросервис». Для опыта были сформированы две группы лактирующих коров: опытная и контрольная по 5 голов в каждой (таблица 3).

Таблица 3 – Схема научно-производственного опыта на лактирующих коровах

Группы	Кол-во животных в группе	Живая масса на начало опыта, кг	Продолжительность, дней	Особенности кормления
Контрольная	5	550–600	20	ОР*
Опытная	5	550–600	20	ОР* + сорбент 40 г/гол. в сутки (67 мг/кг ж.м.)

Примечание: ОР\* – силос, сено, зеленая масса культур зеленого конвейера, комбикорм.

На 20-е сутки опыта удой у коров опытной группы составил  $24,7 \pm 2,0$ , в контрольной группе  $23,9 \pm 2,1$  кг. Исследования молока по таким показателям, как кислотность, массовая доля жира, белка и сухого обезжиренного остатка, плотность, количество соматических клеток, редуцтазная проба, характеризующим потребительские и технологические качества молока, не показали разницы между опытной и контрольной группами. Содержание нормируемых токсических элементов (свинца, мышьяка, кадмия, ртути) в молоке подопытных животных не превышало требования ТР ТС № 021/2011 [9].

За период опыта удельная концентрация цезия-137 в контрольной группе составила 5,93 Бк/кг, в опытной – 2,22 Бк/кг, что на 3,71 Бк/кг оказалось меньше. При этом вынос  $^{137}\text{Cs}$  с молоком в контрольной группе за время опыта при среднем удое 23,9 кг и содержании радионуклида 5,93 Бк/кг составил 14173 Бк, в опытной группе при среднем удое 24,9 кг и содержании радионуклида 2,22 Бк/кг – 5528 Бк, что на 8645 Бк меньше [9].

В четвертом опыте изучали эффективность использования УФС в дозе 40 г/голову на конеферме Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Согласно схеме проведения эксперимента, были отобраны 6 голов взрослых лошадей и разделены на две группы – контрольную и опытную.

Достоверное снижение содержания цезия-137 в мышечной ткани опытной группы подопытных лошадей было установлено с 10 по 30 сутки эксперимента. Так, разница показателей между контрольной и опытной группами на 10, 15, 25 и 30 сутки соответственно составили 65,3, 68, 8, 273,0 и 108,0 Бк/кг. В среднем за время эксперимента удельная активность мышечной ткани в опытной группе оказалась на 112,5 Бк/кг или на 15,1 % ниже, чем в контроле.

Для исследования показателей крови лошадей её пробы отбирались в начале и в конце опыта. Биохимические и гематологические показатели лошадей сравнивались с показателями крови здоровых лошадей в нормальном физиологическом состоянии, соответствующих

половозрастным характеристикам, а также показателей между группами до опыта и в конце опыта. Как следует из анализа сравнения средних результатов по группам животных биохимических показателей с диапазоном справочных значений для здоровых лошадей, то показатели общего белка, альбуминов, холестерина, тиреоглобулина АЛТ, ЛДГ, щелочной фосфатазой, АСТ, глюкозы, магния, железа, кальция, хлоридов, мочевины, мочевой кислоты, креатинина, фосфора, натрия, калия, а также гематологические показатели количества эритроцитов, гемоглобина, тромбоцитов, и лейкоцитов между группами имели практически близкие значения и достоверно не различались [11].

**Заключение.** Анализ результатов исследований свидетельствует, что УФС белорусского производства можно использовать в качестве добавки в рационы для снижения накопления цезия-137 в организме сельскохозяйственных животных: в составе рационов для кроликов в дозах 2 и 4 г/голову, бычков на откорме, лактирующих коров и лошадей в дозе 40 г/голову. Сорбент не оказывает отрицательного влияния на потребление кормов, прирост живой массы, молочную продуктивность, качество продукции, показатели крови животных.

### Литература

1. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99). Гигиенический норматив № 10-117-99 : утв. постановлением Главного гос. санитарного врача Респ. Беларусь 26.04.1999 : введ. 30.04.1999.. – Минск : М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 1999. – 6 с.
2. Подоляк, А. Г. Научные аспекты сельскохозяйственного производства в постчернобыльских условиях : монография / А. Г. Подоляк, В. В. Валетов, А. Ф. Карпенко. – Мозырь : МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. – 242 с.
3. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Н. Н. Цыбулько [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.
4. Карпенко, А. Ф. Эколого-экономические проблемы агропроизводства Гомельской области после Чернобыльской катастрофы: монография / А. Ф. Карпенко. – Брянск : Дельта, 2012. – 258 с.
5. 35 лет после чернобыльской катастрофы : итоги и перспективы преодоления ее последствий : Национальный доклад Республики Беларусь / Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС МЧС Республики Беларусь. – Минск, 2020. – 152 с.
6. Карпенко, А. Ф. Радиоэкологические проблемы сельского населения на загрязненной территории / А. Ф. Карпенко // Проблемы социально-экономического и правового обеспечения инновационного развития Беларуси : материалы XVI Межвузовской научно-практической конференции, Гомель, 3 февраля 2012 г. /под общей ред. С. И. Ляха. – Гомель : Гомельский филиал Международного университета «МИТСО», 2012. – Ч. 2. – С. 105–108.
7. НПП «Эксорб» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://eksorb.com/>. – Дата доступа : 20.04.2023.
8. Композиционный энтеросорбент на основе торфяного активированного угля / А. Э. Томсон [и др.] // Природопользование. – 2018. – № 2. – С. 128–133.
9. Антипенко, О. Н. Эффективность применения углеродного ферроцинсодержащего сорбента в рационах лактирующих коров и кроликов / О. Н. Антипенко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. – 2023. – Т. 68, № 3. – С. 249–256.
10. Проблемы радиационной реабилитации загрязненных территорий / Ю. М. Жученко, В. С. Аверин, С. К. Фирсакова [и др. ] ; под ред. В. Ю. Агееца. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2004. – С. 46.
11. Царенок, А. А. Показатели крови лошадей Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / А. А. Царенок, А. Ф. Карпенко, О. Н. Антипенко // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства : сб. науч. тр. – Горки, 2022. – Вып. 25, ч. 2. – С. 259–265.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Институт радиобиологии НАН Беларуси

## Ингибирование автоокисления адреналина *in vitro* при участии тролокса, аскорбиновой и галловой кислот

Н.Ю. КОЛБАС<sup>1,2</sup>

Для изучения кинетических параметров автоокисления адреналина *in vitro* использовали 200 мМ карбонатный буфер (рН = 10,55), длину волны детектирования – 347 нм, время экспозиции – 60 минут при температуре 21,0°C и 36,6°C. Установлено, что оптимальное время экспозиции для 5,0 мМ раствора адреналина составляет не менее 20 минут, для 1,0 мМ – 33 минуты. Наибольшую ингибирующую способность проявила галловая кислота, наименьшую – тролокс. Предложена схема ингибирования автоокисления адреналина галловой кислотой. Проксидантная активность тролокса была выше, чем у аскорбиновой кислоты, а у галловой кислоты не выявлена.

**Ключевые слова:** адреналин, адrenoхром, антиоксидантная активность, аскорбиновая кислота, галловая кислота, константа скорости реакции, прооксидантная активность, тролокс.

To determine the kinetic parameters of adrenaline autoxidation *in vitro* there was used 200 mM carbonate buffer (pH = 10,55), detection wavelength of 347 nm, exposure time of 60 minutes at 21,0°C and 36,6°C. The optimal exposure time for 5,0 mM adrenaline solution was at least 20 minutes, for 1,0 mM it was 33 minutes. Gallic acid showed the highest inhibitory ability, Trolox showed the least inhibitory ability. A scheme of the inhibition of adrenaline autoxidation by gallic acid was proposed. The prooxidant activity of Trolox was higher than that of ascorbic acid. Prooxidant activity of gallic acid was not revealed.

**Keywords:** adrenaline, adrenochrome, antioxidant activity, ascorbic acid, gallic acid, reaction rate constant, prooxidant activity, Trolox.

**Введение.** Адреналин (эпинефрин, 4-[1-гидрокси-2-(метиламино)этил]-бензен-1,2-диол) – природный катехоламин; гормон, вырабатываемый хромаффинной тканью мозгового слоя надпочечников для регуляции биохимических процессов, направленных на стабилизацию организма в постстрессовых психоэмоциональных ситуациях. В состоянии отдыха содержание адреналина в плазме крови достигает 10 нг/л, но может повышаться в 10 раз во время физических упражнений и в 50 раз или более при стрессе [1].

Адреналин, как и другие катехоламины, метаболизируется несколькими путями: *o*-метилированием с образованием метанефрина и окислительным дезаминированием с образованием винилминдальной кислоты. Кроме того, окисление адреналина может происходить по хиноидному пути до адrenoхрома [2]. В условиях *in vitro* без участия ферментов хиноидное автоокисление этого катехоламина происходит в щелочной среде. При низкой концентрации протонов внутримолекулярная перестройка адреналина до адrenoхрома сопровождается образованием супероксида ( $O_2^{\bullet-}$ ) из растворенного в среде кислорода [2], [3]. Супероксид, в свою очередь, как окислитель и акцептор протонов участвует в дальнейшем окислении адреналина, запуская тем самым цепную реакцию.

Максимум поглощения для адреналина соответствует длине волны 279 нм, раствор адrenoхрома при рН 10,5–10,65, в свою очередь, имеет два пика – 295 и 347 нм, при этом рекомендуемая длина волны детектирования для него – 347 нм [2].

Реакцию автоокисления адреналина используют для оценки антиоксидантной активности (АОА) растительных экстрактов [4], [5]. Однако кинетические параметры этого процесса в условиях *in vitro* с учетом температуры и времени экспозиции реакционной смеси остаются неизученными.

Отметим, что в качестве стандартов АОА чаще применяют водорастворимый аналог токоферола – тролокс (6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновая кислота), реже аскорбиновую и галловую кислоты [6], [7]. Согласно «правилу пяти» Липинского (RO5) и правилу Вебера [8] указанные стандарты обладают пероральной активностью (таблица 1), распределяются больше в плазме, чем в тканях; не проникают через гематоэнцефалический барьер и ЦНС; не обладают мутагенной активностью и гепатотоксичностью [9].

Таблица 1 – Пероральная активность, биодоступность и токсичность изученных соединений

Параметр	Химическое соединение					
	Адреналин	Адренохром	Аскорбиновая кислота	Галловая кислота	Тролокс	
Формула	$C_9H_{13}O_3N$	$C_9H_9O_3N$	$C_6H_8O_6$	$C_7H_6O_5$	$C_{14}H_{18}O_4$	
Молекулярная масса, Да	183,2	179,2	176,1	170,1	250,3	
ID PubChem*	5816	5898	54670067	370	40634	
Правило Липинского	$\lg P^*$	-1,4	-1,3	-1,76	0,7	2,8
	nHD	4	1	4	4	2
	nHA	4	4	6	5	4
	Количество совпадений	0	0	0	0	0
Правило Вебера	$TPSA, \text{ \AA}^*$	72,72	57,6	107,22	98	66,8
	nRB	3	0	2	1	1
Растворимость ( $\lg S$ , моль/л)**	-2,142	-0,973	-1,56	-1,91	-2,73	
Экскреция (общий клиренс, мл/(кг·сут))**	0,935	0,889	0,631	0,518	0,826	
Теоретический объем распределения (л/кг)**	8,433	0,692	0,698	0,014	0,326	
Проникновение через гематоэнцефалический барьер**	слабо	слабо	нет	нет	–	
Токсичность* ( $LD_{50}$ , г/кг)	2,07 (кролики; орально)	0,15 (крысы; интраперитонеально)	–	5,0 (кролики; орально)	4,3 (крысы; орально)	

*Примечание:* «–» – сведения отсутствуют;  $P$  – коэффициент распределения в системе октанол-вода; nHD – количество доноров водородных связей; nHA – количество акцепторов водородных связей; nRB – количество вращающихся связей;  $TPSA$  – от англ. *Topological polar surface area* – топологическая полярная площадь поверхности, \* – согласно данным онлайн базы PubChem [9], \*\* – согласно данным онлайн базы ADMET [10].

**Цель исследования** – определить кинетические параметры автоокисления адреналина *in vitro* с учетом температуры и времени экспозиции, оценить ингибирующую способность тролокса, аскорбиновой и галловой кислот в реакциях автоокисления адреналина.

**Методы исследований.** *Определение кинетических параметров автоокисления адреналина in vitro в щелочной среде.* Для изучения кинетических параметров автоокисления адреналина использовали 0,5, 1,0, 5,0 и 10,0 мМ водные растворы адреналина и карбонатный буферный раствор (200 мМ  $Na_2CO_3/NaHCO_3$ , pH = 10,55). Реакционную смесь готовили путем добавления 20 мкл соответствующего раствора адреналина к 320 мкл карбонатного буфера. Изменение оптической абсорбции регистрировали в течении 60 минут, с шагом 5 минут, при длине волны 347 нм с использованием комбинированного спектрофлуориметра BMG FLUOstar Omega (Германия) с устройством для считывания микропланшеты и термостатированием. Температуры экспозиции: 21,0°C и 36,6°C. Все опыты проводили в трехкратной повторности.

Автоокисление адреналина подчиняется кинетическому уравнению реакций первого порядка [2]. Константу скорости реакции рассчитывали в программе Microsoft Excel [11], учитывая экспоненциальную зависимость концентрации адреналина от времени реакции. Период полуреакции определяли по формуле:  $t_{1/2} = \ln 2/k$ , где  $k$  – константа скорости реакции ( $\text{мин}^{-1}$ ). Время, за которое происходит окисление 90 % адреналина от первоначального, рассчитывали, как  $T = 1/k$ .

*Определение ингибирующей способности тролокса, аскорбиновой и галловой кислот.* Исходные растворы тролокса (99,9 %, Aldrich, CAS 53188-07-1), аскорбиновой (ACS /  $\geq 99$  %, Aldrich, CAS 50-81-7) и галловой (ASC /  $>98$  %, Sigma-Aldrich, CAS 149-91-7) кислот были приготовлены в 70 %-ном этаноле. Используемые концентрации тролокса – от 0,5 до 20,0 мМ, аскорбиновой кислоты – от 0,5 до 10,0 мМ, галловой кислоты – от 0,005 до 10,0 мМ. Для моделирования реакции использовали реакционную смесь, содержащую 20 мкл раствора исследуе-

мого вещества, 20 мкл раствора адреналина (5,0 мМ в 70 %-ном этаноле) и 300 мкл карбонатного буфера (200 мМ, pH = 10,55) [2]. Изменение оптической абсорбции реакционной смеси ( $A_{PC}$ ) регистрировали в течение 20 минут с шагом 5 минут, при длине волны 347 нм и температуре экспозиции 36,6°C. Кроме того, регистрировали изменение абсорбции 5,0 мМ раствора адреналина в карбонатном буфере (А) и образца в карбонатном буфере (контроль,  $A_K$ ) при вышеописанных условиях. Все опыты проводили в трехкратной повторности.

Ингибирование автоокисления адреналина (в %) рассчитывали по формуле:  $[(A - A_E)/A] \times 100$ , где А – оптическая абсорбция адреналина в карбонатном буфере,  $A_E$  – разница между  $A_{PC}$  и абсорбцией контроля ( $A_K$ ). В случае, если ингибирование было в пределах от -10 % до +10 % судили об отсутствии как ингибирующего, так и активирующего эффекта по отношению к автоокислению адреналина, если  $A < A_E$  было более чем на 10 %, то действие анализируемого вещества считали прооксидантным.

**Результаты.** *Кинетические параметры автоокисления адреналина in vitro.* Изменение абсорбции реакционной смеси при температурах 21,0°C и 36,6°C представлено на рисунке 1. Кривые имеют вид гиперболы, которая наиболее ярко выражена при температуре экспозиции 36,6°C для исходных концентраций адреналина 1,0 и 0,5 мМ. Для 10,0 мМ растворов адреналина не удалось провести реакцию 60 минут, так как образовавшийся адренохром имеет интенсивное розовое окрашивание и его абсорбция лежит за пределами чувствительности прибора.

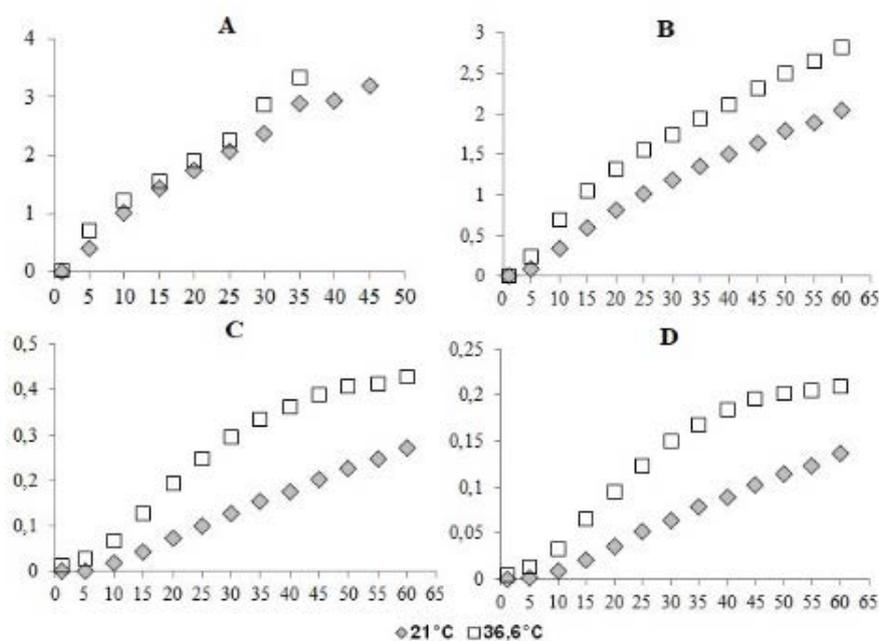


Рисунок 1 – Изменение абсорбции растворов адреналина в карбонатном буфере (pH = 10,55) при длине волны 347 нм и разных температурах экспозиции

*Примечание:* по оси абсцисс – время, минуты; по оси ординат – абсорбция, опт.ед; исходные концентрации адреналина (ммоль/л): А – 10,0, В – 5,0, С – 1,0, D – 0,5.

Кинетические параметры реакции автоокисления адреналина представлены в таблице 2. Проведенный статистический анализ выявил высокую корреляционную связь между временем экспозиции и абсорбцией. Коэффициенты корреляции (*r-Pearson*) варьировали от 0,911 до 0,995 при уровне значимости (*p*) менее 0,05. При 36,6°C для 5,0 мМ раствора 50 % от первоначального содержания адреналина подвергается автоокислению через 20 минут, при 21,0°C – через 33 минуты. Отметим, что именно 5,0 мМ раствор адреналина применяют в оценке АОА биологически активных веществ и экстрактов [4], [5] и данная концентрация наиболее соответствует концентрации фармакопейного препарата (5,46 мМ). В своей работе Л.М. Федосеева с соавт. [4] использовали время экспозиции 3, 5 и 10 минут при температуре 20–22°C, что, согласно полученным нами результатам, является малоинформативным. 50 %-

ное автоокисление исходного 1,0 мМ раствора адреналина при обеих температурах происходит практически в одном временном промежутке (при 21,0°C – за 21 минуту, при 36,6°C – за 20,4 минуты). Для 0,5 мМ раствора 50 %-ное автоокисление осуществляется за 19 минут при 21,0°C и за 11 минут при 36,6°C.

Таблица 2 – Кинетические параметры автоокисления адреналина при разной температуре экспозиции

Начальная концентрация адреналина, (ммоль/л)	Кинетическое уравнение	R <sup>2</sup>	k (мин <sup>-1</sup> )	τ <sub>1/2</sub> , мин	T, мин
температура 21,0°C					
10	$y = 9,9627 \exp(-0,019x)$	0,993	0,019	36,48	52,63
5	$y = 5,2654 \exp(-0,021x)$	0,995	0,021	33,00	47,62
1	$y = 0,9139 \exp(-0,033x)$	0,952	0,033	21,00	30,30
0,5	$y = 0,4171 \exp(-0,037x)$	0,972	0,037	18,74	27,03
температура 36,6°C					
10	$y = 10,088 \exp(-0,024x)$	0,981	0,024	28,88	41,67
5	$y = 5,6809 \exp(-0,035x)$	0,979	0,035	19,80	28,57
1	$y = 0,9976 \exp(-0,034x)$	0,977	0,034	20,39	29,41
0,5	$y = 0,5787 \exp(-0,062x)$	0,911	0,062	11,18	16,13

*Примечание:* y – концентрация адреналина, мМ; x – время экспозиции, минуты; k – константа скорости реакции; τ<sub>1/2</sub> – период полуреакции; T – время, за которое происходит окисление 90 % адреналина от первоначального.

*Ингибирующая способность тролокса, аскорбиновой и галловой кислот по отношению к автоокислению адреналина.* После 20 минут реакции ингибирование автоокисления адреналина аскорбиновой кислотой варьировало от 13,9 до 60,9 % в зависимости от концентрации. По мере экспозиции значение параметра снижалось для всех концентраций аскорбиновой кислоты кроме 0,5 мМ (рисунок 2-А).

Для галловой кислоты процент ингибирования был от 17,3 (0,005 мМ, молярное соотношение адреналин:вещество – 1:0,001) до 97,1 (10,0 мМ, молярное соотношение 1:2). Отметим, что галловая кислота во всех изученных концентрациях проявляла только АОА (рисунок 2-В).

Антиоксидантное действие галловой кислоты основано на ее восстановлении до феноксил радикала (галлатсемихинона) с одновременным депротонированием [12]. Предполагаемая схема антиоксидантного действия галловой кислоты представлена на рисунке 3 и включает перехват радикалов адреналинсемихинона (точка 1), арденохромсемихинона (точка 2) и супероксида (точки 3). Реакции протекают по согласованному двойному механизму переноса атома водорода (*HAT* механизм – от англ. *Hydrogen Atom Transfer*) и электрона (*SET* механизм – от англ. *Single Electron Transfer*). Образующийся при этом галлатсемихинон стабилен. Его стабилизация поддерживается за счет двух внутримолекулярных водородных связей при участии ОН-групп в орто-положении [13]. Известно, что феноксил-радикалы могут восстанавливаться при взаимодействии с другими антиоксидантами, имеющими более низкие редокспотенциалы [14]. В рассматриваемом нами процессе донорами протонов могут выступать адреналин и лейкоаденохром. Вторым продуктом реакции галловой кислоты с супероксидом является пероксид водорода, который в свою очередь способен окислять следующую молекулу адреналина и запускать новый цикл реакций [15]. Галловая кислота, как и другие антиоксиданты (в том числе тролокс), может восстанавливать пероксид водорода и превращаться в галлат-*o*-хинон [13] (рисунок 3, точки 5). В данном случае галловая кислота выступает в роли пероксидазного миметика.

Для тролокса после 20 минут экспозиции ингибирование автоокисления адреналина варьировало от 2,3 % до 20,0 %. Для большинства концентраций тролокса отмечен пик ингибирования на 5 минуте экспозиции (рисунок 2-С). АОА выявлена для 20,0 мМ раствора тролокса (молярное соотношение адреналин:вещество – 1:4, ингибирование 20 %), а также для 5,0 мМ (соотношение 1:1, ингибирование 13,9 %), 7,5 мМ (соотношение 1:1,5, ингибирование 50,4 %) и 10,0 мМ (соотношение 1:2; ингибирование 60,9 %) растворов аскорбиновой кислоты.

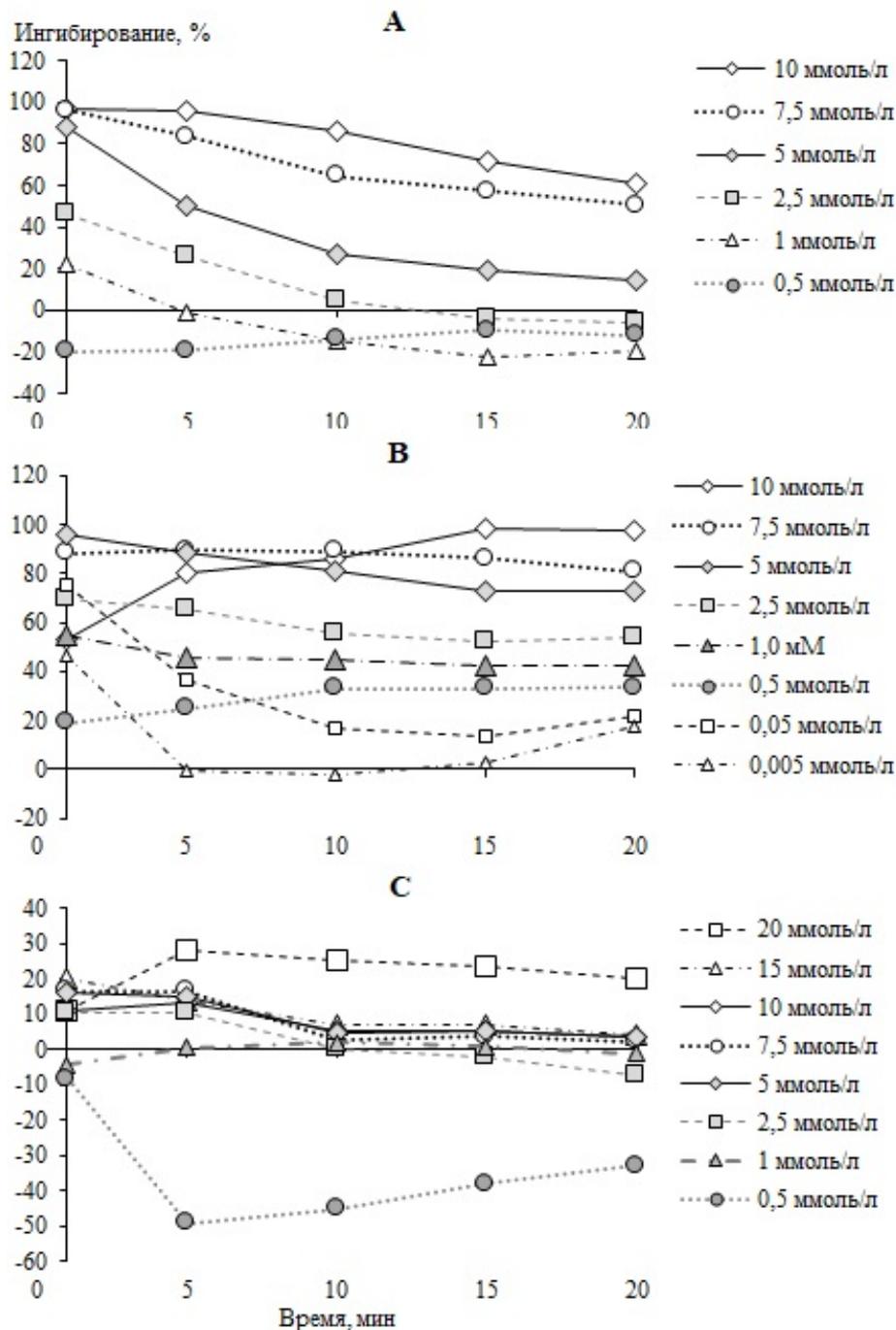


Рисунок 2 – Ингибирование *in vitro* реакции автоокисления адреналина при участии аскорбиновой кислоты (А), галловой кислоты (В) и тролокса (С)

Прооксидантная активность характерна для 0,5 мМ растворов тролокса и аскорбиновой кислоты, а также для 1,0 мМ раствора аскорбиновой кислоты после 10 минут экспозиции.

Прооксидантная активность галловой кислоты в смоделированных нами условиях не установлена. Отсутствие как антиоксидантного, так и прооксидантного эффектов характерно для 1,0 мМ раствора тролокса, а после 5 минут экспозиции – для 2,5, 5,0, 7,5, 10,0 мМ растворов этого вещества и для 2,5 мМ раствора аскорбиновой кислоты (рисунок 2-А и 2-С). После 10 минут реакции анти- и прооксидантное действие отсутствует и у 0,5 мМ раствора аскорбиновой кислоты (рисунок 2-А). О.С. Бровко с соавт. [16] отмечают, что аскорбиновая кислота в концентрации менее 0,14 ммоль/л не способна эффективно ингибировать процесс автоокисления адреналина при pH = 2,0 и времени экспозиции 3, 5, 7 и 10 минут.

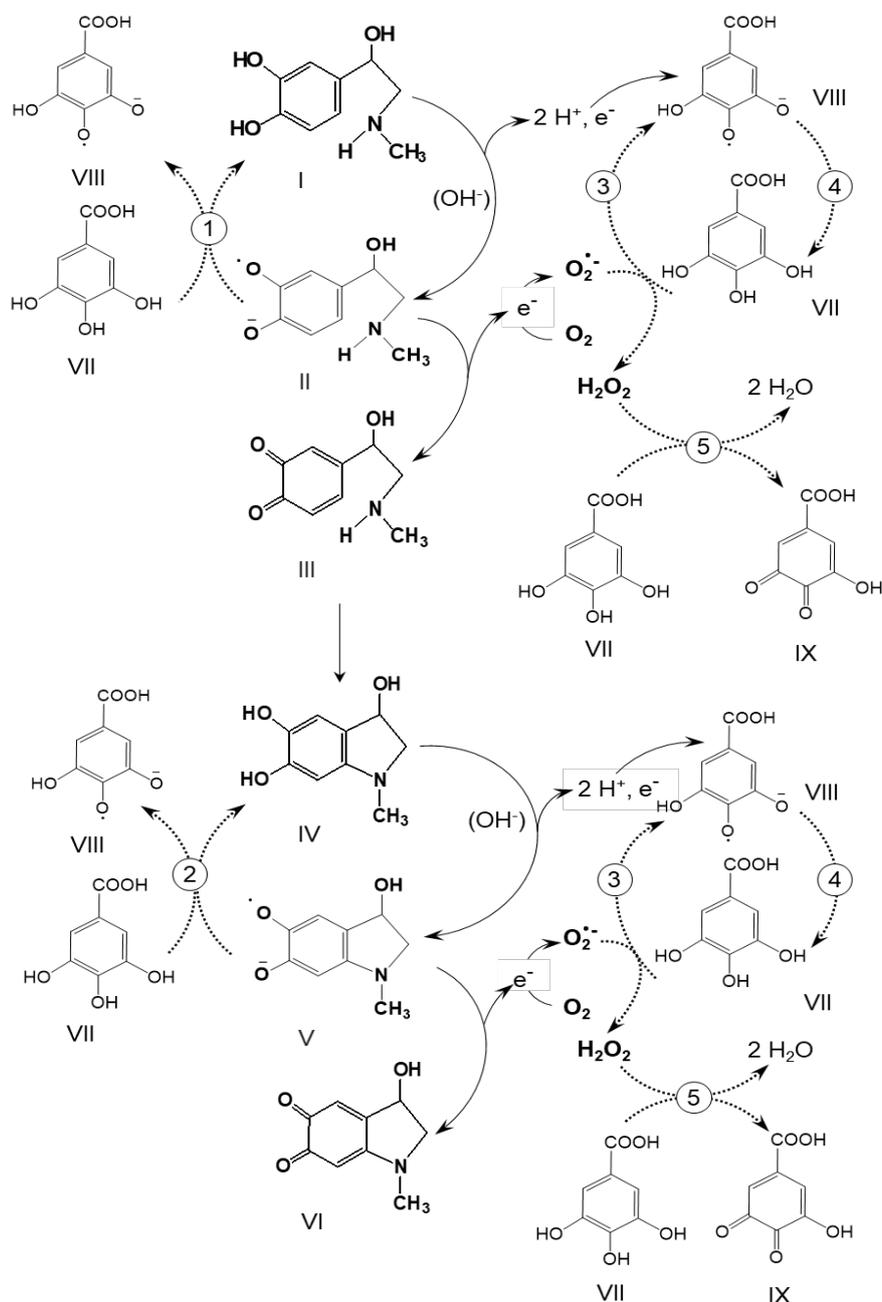


Рисунок 3 – Предполагаемая схема ингибирования автоокисления адреналина галловой кислотой

*Примечание:* I – адреналин, II – адреналинсемихинон, III – адреналинхинон, IV – лейкоадренохром, V – адренохромсемихинон, VI – адренохром, VII – галловая кислота, VIII – галлатсемихинон, IX – галлат-*o*-хинон; 1–5 – точки сопряжения автоокисления адреналина и антиоксидантного действия галловой кислоты (пояснения в тексте статьи)

**Заключение.** Для оценки *in vitro* анти-/прооксидантной способности биологически активных веществ могут быть использованы 5,0 Мм (фармакопейный препарат 5,46 мМ) и 1,0 мМ растворы адреналина. С учетом кинетических параметров наиболее оптимальной продолжительностью экспозиции реакционной смеси при температуре 36,6°C является 20 минут, при 21,0°C – 21 минута для 5,0 мМ и 33 минуты для 1,0 мМ растворов адреналина.

Установлено, что ингибирование реакции автоокисления адреналина находится в прямой зависимости от концентраций тролокса, аскорбиновой и галловой кислот. Антиоксидантный эффект снижается в ряду: галловая кислота > аскорбиновая кислота > тролокс. Галловая кислота проявляет АОО в широком диапазоне концентраций (от 0,005 мМ до 10,0 мМ) за счет блокировки образующихся свободнорадикальных частиц семихинонов адреналина и адрено-

хрома, супероксидов (по водород-донорному и электрон-донорному механизмам), а также путем восстановления пероксида водорода (по типу пероксидазного миметика). По отношению к автоокислению адреналина прооксидантная активность для галловой кислоты не выявлена. Выявленный прооксидантный эффект тролокса был выше, чем у аскорбиновой кислоты.

### Литература

1. Systemic catecholaminergic deficiency in depressed patients with and without coronary artery disease / U. Hoppmann [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2022. – Vol. 10, is. 5. – P. 986–999.
2. Sirota, T. V. A Novel approach to study the reaction of adrenaline autooxidation : a possibility for polarographic determination of superoxide dismutase activity and antioxidant properties of various preparations / T. V. Sirota // *Biochemistry (Moscow)*. – 2011. – Vol. 5, № 3. – P. 253–259.
3. Kinetics of the autoxidation of adrenaline and [copper(II)(adrenaline)]<sup>2+</sup> in alkaline aqueous and micellar media / A. S. Al-Ayed [et al.] // *Transition Metal Chem.* – 2013. – Vol. 38. – P. 173–181.
4. Федосеева, Л. М. Определение антиоксидантной активности настоя травы шавеля кислого методом *in vitro* / Л. М. Федосеева, Г. Р. Кутателадзе // *Научные результаты биомедицинских исследований*. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 64–70.
5. Антиоксидантная активность плодов таксонов сем. *Ericaceae* при выращивании на торфяных выработках в южной части Припятского Полесья / Ж. А. Рупасова [и др.] // *Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта*. – 2013. – № 5 (77). – С. 50–57.
6. Amorati, R. Methods to measure the antioxidant activity of phytochemicals and plant extracts / R. Amorati, L. Valgimigli // *J. Agric. Food Chem.* – 2018. – Vol. 66, № 13. – P. 3324–3329.
7. Munteanu, I. G. Analytical methods used in determining antioxidant activity : a review / I. G. Munteanu, C. Apetrei // *Int. J. Mol. Sci.* – 2021 – Vol. 22, № 7. – P. 3380–3410.
8. Molecular Docking Study on Several Benzoic Acid Derivatives against SARS-CoV-2 / A. Stefaniu [et al.] // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25. – P. 5828–5840.
9. Pharmacokinetic properties ADMET [Electronic resource]. – Mode of access : <http://biosig.unimelb.edu.au/pkcsmprediction>. – Date of access : 19.06.2023.
10. PubChem. Open chemistry database at the National Institutes of Health [Electronic resource]. – Mode of access : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>. – Date of access : 19.06.2023.
11. Microsoft Office [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/free-office-online-for-the-web>. – Date of access : 21.01.2021.
12. Utrera, M. Impact of trolox, quercetin, genistein and gallic acid on the oxidative damage to myofibrillar proteins : the carbonylation pathway / M. Utrera, M. Estévez // *Food Chem.* – 2013. – Vol. 141, № 4. – P. 4000–4009.
13. Badhani, B. Gallic acid: a versatile antioxidant with promising therapeutic and industrial applications / B. Badhani, N. Sharma, R. Kakkar // *RSC Advances*. – 2015. – Vol. 5, № 35. – P. 27540–27557.
14. Костюк, В. А. Роль эндогенных и экзогенных антиоксидантов в защите кожи от негативного воздействия экспозомы / В. А. Костюк // *Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта*. – 2021. – № 2. – С. 3–12.
15. Concerted double proton-transfer electron-transfer between catechol and superoxide radical anion / J. Quintero-Saumeth [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2017. – Vol. 19, № 38. – P. 26179–26190.
16. Бровко, О. С. Количественное определение антиоксидантной активности по ингибированию автоокисления адреналина / О. С. Бровко, А. Д. Ивахнов, Т. А. Бойцова // *Вестник ВГУ. Сер. : Химия. Биология. Фармация*. – 2022. – № 3. – С. 5–12.

<sup>1</sup>Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси

<sup>2</sup>Центральный ботанический сад НАН Беларуси

Поступила в редакцию 20.07.2023

## Влияние инокулянта «Ресойлер» на взаимоотношения основных эколого-трофических групп микроорганизмов в посевах озимой ржи

И.И. КОНЦЕВАЯ, Н.М. ДАЙНЕКО, С.Ф. ТИМОФЕЕВ, Т.А. МЕДВЕДСКАЯ

В полевом опыте получены доказательства эффективности применения на стадии «выход в трубку» в посевах озимой ржи инокулянта «Ресойлер» на исследуемый микробиоценоз дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Данные указывают, что обработка микробиологическим инокулянтом при недостатке почвенной влаги в анализируемые летние месяцы способствует поддержанию стабильности изучаемого агробиоценоза.

**Ключевые слова:** почвенные ассоциации микроорганизмов, эколого-трофические группы микроорганизмов, микробиологический инокулянт, Ресойлер, *Trichoderma*.

In a field experiment, the evidence of the effectiveness of application of the «Resoiler» inoculant on the studied microbiocenosis of sod-podzolic light loamy soil at the stage of «emergence into the tube» in winter rye crops was obtained. The data indicate that treatment with microbial inoculant at soil moisture deficit in the analyzed summer months contributes to maintaining the stability of the studied agrobiocenosis.

**Keywords:** associations of soil microorganisms, ecological and trophic groups of microorganisms, microbiological inoculant, Resoiler, *Trichoderma*.

**Введение.** Тестируемый в исследовании микробиологический инокулянт «Ресойлер» разработан Республиканским научным дочерним унитарным предприятием «Институт защиты растений» [1]. Концентрация действующего вещества составляет: *Trichoderma* sp. L-3, КОЕ не менее 5,4 млрд./мл; *Trichoderma* sp. L-6, КОЕ не менее 5,9 млрд./мл; содержание биомассы – не менее 20 г/л [1]. По сведениям разработчиков, полифункциональный механизм действия препарата «Ресойлер» обеспечивает интенсификацию разложения растительных остатков, снижение количества токсинообразующих и фитопатогенных микроорганизмов на растительных остатках и в почве, стимуляцию роста и развития культур; повышает доступность элементов питания для растений [1]–[4], способствуя увеличению их продуктивности на 10–15 % [4]. Установлено, что препараты на основе данных грибов-антагонистов оказывают содействие поддержанию стабильности агробиоценозов [3]. «Ресойлер» может применяться как перед посевом, так и после уборки культуры [1].

Сорта озимой ржи белорусской селекции занимают 97,2 % площадей, отводимых под рожь в республике [5]. Приоритетным направлением в селекции зерновых культур, помимо высокого качества продукции, является в том числе сочетание высокой отзывчивости на плодородие почвы и устойчивости к лимитирующим факторам среды, что обеспечивает эффективное использование финансовых ресурсов, энергосбережение, экологическую безопасность и повышает рентабельность производства [5], [6].

**Цель работы** – изучение влияния инокулянта «Ресойлер» на особенности взаимоотношений между почвенными микроорганизмами разных экологических ниш в посевах озимой ржи, культивируемой на почве Гомельского региона республики.

**Методы исследования.** Исследования проводили в вегетационный период 2022 г. на почвах агрокомбината «Южный» (н. п. Костюковка Гомельского района Гомельской области). В качестве объекта исследований изучали биологическую активность агрономически полезных групп микроорганизмов при обработке инокулянтом «Ресойлер» посевов озимой ржи сорта «Голубка».

Почва имела следующие агрохимические параметры: рН в КСl – 5,9; фосфор – 281 мг/кг; калий – 262 мг/кг. Площадь отдельных опытных делянок была равна 5 м<sup>2</sup>, размещение рендомизировано; повторность опытов – 4-х кратная. Используемая норма расхода микробиологического инокулянта «Ресойлер» составляла 5–10 л/га.

Опыт заложен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на посевах озимой ржи по схеме:

1) контроль – без обработки посевов микробным инокулянтом «Ресойлер»;

2) обработка посевов микробным инокулянтом «Ресойлер». Выполняли прикорневую подкормку растений по всходам в фазе «выход в трубку» (в мае).

Микробиологическое исследование почвы выполняли в соответствии с общепринятыми в почвенной микробиологии методами [7]. Отбор почвенных образцов проводили по следующим фазам роста и развития озимой ржи: фаза «выход в трубку», фаза «колошения», фаза «созревания (восковая спелость)».

В опыте представлены следующие варианты:

– к (контроль) – отбор почвы выполняли на стадии «выход в трубку» ржи (май), почва без обработки посевов инокулянтом «Ресойлер»;

– к1 (контроль 1) – отбор почвы осуществляли на стадии «колошения» ржи (июнь), почва без обработки посевов инокулянтом «Ресойлер»;

– о1 (опыт 1) – почву отбирали на стадии «колошения» ржи (июнь), обработка посевов инокулянтом «Ресойлер»;

– к2 (контроль 2) – отбор почвы проводили на стадии «созревания» ржи (июль), почва без обработки посевов инокулянтом «Ресойлер»;

– о2 (опыт 2) – отбор почвы выполняли на стадии «созревания» ржи (июль), обработка посевов инокулянтом «Ресойлер».

При оценке действия инокулянта «Ресойлер» на микробонаселение почвы применяли чашечный метод Коха. С его помощью вычисляли численность представителей почвенных микроорганизмов основных экологических ниш, культивированных на селективных питательных средах. Все посева выполняли в трехкратной повторности.

Численность микроорганизмов устанавливали в колониеобразующих единицах (КОЕ) при пересчете на 1 г абсолютно сухой почвы. Расчет эколого-физиологических индексов и коэффициентов выполняли согласно рекомендациям научно-методического пособия [8].

Полученные в эксперименте данные подвергали статистической обработке с применением пакета прикладного программного обеспечения «Statsoft (USA) Statistica v.7.0». Сравнение изучаемых показателей между опытными и контрольными группами выполняли с применением t-критерия Стьюдента. Нулевую гипотезу отклоняли при уровне статистической значимости  $P < 0,05$  [9]. Данные в таблице приведены в виде  $M \pm m$ , где  $M$  – среднее арифметическое,  $m$  – ошибка среднего арифметического.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Метеорологические условия за три месяца вегетационного периода 2022 г., когда производили отбор почвы, представлены в таблице 1. Согласно исходным данным метеорологических наблюдений, был рассчитан гидротермический коэффициент (ГТК) по Г.Т. Селянинову [10], который используют при работе со злаковыми культурами и в настоящее время [11]. В упомянутых работах приведена классификация зон увлажнения по ГТК [10], [11].

Таблица 1 – Метеорологические условия по данным Гомельского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2022 г. [12], [13]

Месяц	Среднемесячное количество			Средне многолетнее количество	
	температур, °С	осадков, мм	ГТК, 2022 г.	температур, °С	осадков, мм
май	12,0	56,9	1,6	13,9	55,0
июнь	20,6	52,0	0,8	17,0	79,0
июль	19,3	76,7	1,3	19,8	90,0
среднее	17,3		1,0	16,9	
сумма осадков, мм		185,6			224,0

Гидротермический коэффициент увлажнения за анализируемые вегетационные месяцы в среднем составил 1,0. Такое значение интерпретируется как слабо засушливый период (таблица 1), и что для роста и развития озимой ржи, как относительно засухоустойчивой культуры, допустимо [6].

Приведенные в таблице 1 данные показывают, что погодные условия в период май-июль 2022 г. можно охарактеризовать как слабо засушливые: средняя температура за вегетационный период была на 0,4 градуса по Цельсию выше среднее многолетнее значение, а количество вы-

павших осадков – меньше на 38,4 мм. Условия увлажнения по гидротермическому коэффициенту относятся, соответственно, к неустойчивому, с тенденцией к недостаточному. Необходимо подчеркнуть неравномерность выпадения осадков по месяцам, особенно во время ключевых фаз роста озимой ржи. Недостаток почвенной влаги в анализируемые летние месяцы также мог отрицательно воздействовать на рост и развитие микроорганизмов почвы [6], [10].

Охарактеризуем микробонаселение почвы и контролируемые микроорганизмами процессы превращения органического вещества (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние инокулянта «Ресойлер» на численность микроорганизмов основных экологических ниш в посевах озимой ржи, КОЕ/г абс.сух. почвы  $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	к	к1	о1	к2	о2
<b>зимогенная экологическая ниша</b>					
аммонифицирующие	70,9 ± 6,2	105,5 ± 9,2	65,0 ± 6,0*	31,1 ± 3,0	30,2 ± 3,0
споровые аммонификаторы	4,5 ± 0,3	5,5 ± 0,4	6,0 ± 0,5	2,5 ± 0,4	1,9 ± 0,3
амилолитические	103,5 ± 10,1	65,0 ± 6,2	124,9 ± 11,0*	44,6 ± 4,2	38,5 ± 3,2
целлюлозоразрушающие аэробные	84,5 ± 7,4	102,5 ± 9,4	69,4 ± 7,2*	56,0 ± 5,2	67,3 ± 6,2
<b>олиготрофная экологическая ниша</b>					
фосфатмобилизующие бактерии	0,5 ± 0,04	3,8 ± 0,4	0,7 ± 0,06*	3,6 ± 0,4	2,9 ± 0,3
олигонитрофильные	70,0 ± 6,2	49,9 ± 5,2	74,5 ± 8,1*	73,6 ± 7,0	42,5 ± 4,2*
олигокарбофильные	122,3 ± 11,2	113,0 ± 10,1	127,7 ± 12,5	64,4 ± 7,0	64,5 ± 7,1
<b>автохтонная экологическая ниша</b>					
автохтонные. Олиготрофы	77,3 ± 7,9	91,5 ± 10,0	47,0 ± 5,1*	37,6 ± 4,0	62,1 ± 6,9*
<b>миксотрофно-синтетическая экологическая ниша</b>					
микровицеты	0,00001 ± 0,0000001	0,0012 ± 0,0001	0,001 ± 0,0001	0,04 ± 0,005	0,01 ± 0,002*

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

В образцах необработанной почвы, отобранной для анализа в июне, отмечали существенное повышение численности в 1,5 раза аммонификаторов и в 1,2 раза целлюлозолитической аэробной микрофлоры по сравнению со значениями начального контроля. Данные показывают, что в первом летнем месяце активизируются процессы разложения азотсодержащего и безазотистого (группа полисахаридов, целлюлоза) органического вещества почвы [8] по сравнению с образцами почвы, отобранными в мае. В тоже время отмечали снижение интенсивности разложения безазотистого органического вещества почвы из группы олигосахаридов и крахмала по причине значительного снижения количества микроорганизмов амилолитической микрофлоры в июне. В почве, отобранной в июле, наоборот, наблюдали существенное снижение значений численности для всех представителей зимогенной экологической ниши при сравнении с данными за май и июнь. Полученные показатели свидетельствуют о снижении процессов разложения свежей органической биомассы, что можно объяснить уменьшением количества микроорганизмов в почве.

Спустя один месяц после обработки инокулянта «Ресойлер» по сравнению с соответствующим контрольным значением отмечали существенное снижение численности аммонифицирующих и целлюлозолитических аэробных бактерий (таблица 2). В тоже время для представителей амилолитической группы выявлено существенное увеличение численности. Полученные данные указывают, что инокулянт «Ресойлер» через один месяц после применения (в июне) индуцирует снижение процессов разложения азотсодержащего и безазотистого из группы полисахаридов и целлюлозы органического вещества почвы по сравнению с соответствующим контролем. В июле не отмечено различий по формированию промежуточного органического вещества между значениями опытного и контрольного вариантов по всем анализируемым группам микроорганизмов из зимогенной экологической ниши.

Олиготрофная микробная ниша участвует в биохимическом упрощении остатков промежуточного органического вещества почвы, что содействует его подготовке к процессу гумификации [8]. По отношению к образцам необработанной почвы отмечено следующее. Если для фосфатлитических микроорганизмов наблюдали в анализируемые летние месяцы по-

ложительную динамику в повышении численности по сравнению с данными за май, то для олигокарбофильной микрофлоры отмечали уменьшение численности. Сказанное свидетельствует о снижении скорости процессов глубокой минерализации органического вещества почвы и замедлении начала его гумификации.

Для олигонитрофильной микрофлоры установлено в июне подавление процессов деструкции азотистых компонентов гуминовых и фульвокислот гумуса, снижение в почве несимбиотической азотфиксации, а в июле, наоборот, эти процессы возросли.

В опытных образцах почвы инокулянт «Ресойлер» оказал существенное влияние на численность представителей фосфатлитических и олигонитрофильных групп. В июне значительно снижено число фосфатлитических бактерий в 5,3 раза, в июле количество данных бактерий возрастает в 5,0 раз, показывая сопоставимые результаты при сравнении со значениями соответствующего контроля.

По отношению к олигонитрофильной микрофлоре отмечено в июне достоверное увеличение в 1,5 раза численности бактерий по сравнению с контрольным значением. В июле картина меняется на обратную, что указывает на возрастание процессов деструкции азотистых компонентов гуминовых и фульвокислот гумуса и усиления процессов несимбиотической азотфиксации в почве.

Не установлено влияния тестируемого микробного инокулянта на изменение скорости процессов глубокой минерализации органического вещества почвы и начала его гумификации. В мае и июне данные процессы проходили интенсивно и в необработанной и в обработанной (опыт) почве. В июле же и в контрольном, и в опытном вариантах отмечено существенное снижение значения КОЕ/г, что свидетельствует об ослаблении процессов глубокой минерализации специфического органического вещества почвы.

При рассмотрении функционирования автохтонной микробной ниши, которая, используя специфическое органическое вещество, участвует в разложении, трансформации и продуцировании гумусовых веществ почвы, наблюдали в образцах необработанной почвы в динамике сначала возрастание интенсивности реакций поликонденсации и полимеризации в июне, а затем значительное снижение в июле.

Установлено, что инокулянт «Ресойлер» в июне инициирует подавление процессов, которые контролируют представители автохтонной микрофлоры, а в июле, наоборот, усиливает их.

В отношении деятельности представителей миксотрофно-синтетической экологической ниши следует отметить, что в июне процессы трансформации всевозможных компонентов органического вещества почвы и продуцирование пигментов гуминоподобного типа существенно возрастают (более чем в 100 раз) и в необработанной и в обработанной «Ресойлером» почве по сравнению с данными за май. В июле, когда наблюдали еще более значительное возрастание численности представителей микромицетов в контрольном варианте (более чем в 4000 раз при сравнении с данными начального контроля), в опытном варианте значение все же было ниже (таблица 2).

При изучении почвенной микробиоты в сельскохозяйственном земледелии, кроме установления численности основных групп микробоценоза, очень важно рассчитать эколого-физиологические индексы и коэффициенты, что позволяет установить особенности взаимоотношений между представителями микроорганизмов основных экологических ниш, которые принимают участие в многоступенчатом процессе разложения и преобразования органического вещества почвы [8].

Коэффициент минерализации и иммобилизации Мишустина указывает на степень интенсивности разложения легкодоступного вещества и активизации начальной стадии процесса гумусообразования. В контрольных вариантах в июне наблюдали снижение коэффициента в 2,3 раза, в июле – восстановление до значения начального контроля, равное 1,5 (рисунок 1). Полученные данные свидетельствуют о том, что в июне существенно возросли минерализационные процессы, в то время как в мае и июле отмечали иммобилизационные процессы. Как известно, минерализация увеличивает биодоступность питательных веществ, которые входили в состав разлагающихся органических соединений, в первую очередь из-за их количества [8], [9].

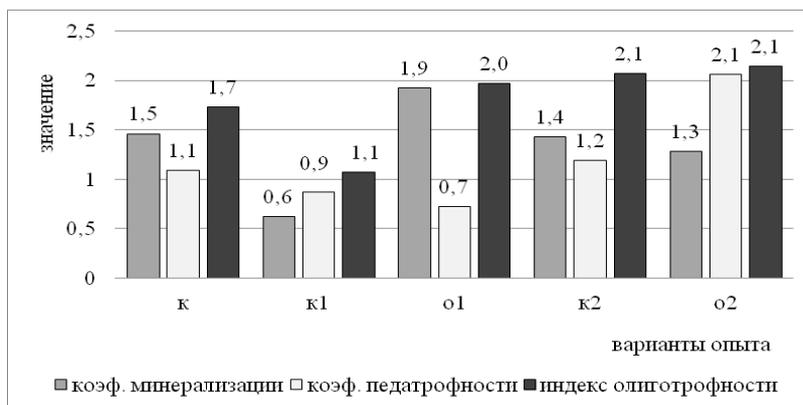


Рисунок 1 – Влияние инокулянта «Ресойлер» на эколого-трофические индексы и коэффициенты

Анализ влияния инокулянта «Ресойлер» показал, что в июне инокулянт инициирует усиление иммобилизационных процессов, в то время как в почве контрольного варианта преобладали процессы минерализации. В июле не установлено воздействия инокулянта на изменение процессов преобразования неорганических соединений в органические по сравнению со значением контрольного варианта. Полученные значения коэффициента, соответственно 1,3 и 1,4 (рисунок 1), свидетельствуют об отсутствии различий в образцах необработанной и обработанной инокулянт-ом почвах, в которых преобладают процессы иммобилизации и происходит интенсивное использование азота почвы микроорганизмами с включением в биомассу бактерий. Поскольку в опытных вариантах при сравнении со значениями в контроле отмечено значимое снижение численности аммонификаторов, либо значения сопоставимы, то данные процессы происходят за счет развития амилитической части микробсообщества почвы (таблица 2). Их представители показывают активность в трансформации разного происхождения углеводов и связывании молекулярного азота.

Индекс (коэффициент) педотрофности Никитина позволяет оценить уровень развития микроорганизмов, которые входят в состав автохтонной экологической ниши, а также принимают участие в почвообразовании гумусовых веществ [8].

Для необработанной почвы, отобранной в посевах озимой ржи, на начальном этапе эксперимента отмечали значение коэффициента педотрофности равное 1,1 (рисунок 1). В июне установлено уменьшение значения коэффициента до 0,9, а в июле – небольшое повышение до 1,2 (рисунок 1). Такие результаты свидетельствуют, соответственно, сначала о снижении интенсивности формирования гумусовых веществ почвы, а в июле – наоборот, увеличении, тем самым указывая на повышение устойчивости тестируемого агробиогенеза к негативным внешним воздействиям.

В опытном варианте в июне более низкое значение коэффициента педотрофности по сравнению с соответствующим контрольным значением, соответственно, 0,7 и 0,9, характеризуется как замедление процессов разложения, трансформации и продуцирования гумусовых веществ почвы, за что отвечают представители автохтонной микрофлоры (таблица 2).

В тоже время в июле в опытном варианте значения коэффициента педотрофности возрастают в 1,7 раза по сравнению с контролем, достигая 2,1, что указывает на активизацию процессов гумусообразования на последних этапах преобразования почвы. В итоге обработка инокулянт «Ресойлер» повышает устойчивость биогенеза к негативным воздействиям со стороны антропогенных вмешательств.

Индекс олиготрофности Аристовской дает информацию об активности представителей автохтонной экологической ниши, которая объединяет олиготрофную часть микрофлоры почвы (таблица 2), принимающую участие в биохимических реакциях разложения остатков органической биомассы. В опыте установлено увеличение значения индекса олиготрофности Аристовской с 1,1 до 2,0 – в июне, и отсутствие каких-либо изменений – в июле. Эти данные свидетельствуют о том, что уже в первый летний месяц вегетации инокулянт «Ресойлер» инициирует замедление процессов деструкции органического вещества почвы промежуточной степени разложенности, тем самым замедляет его подготовку к процессу гумификации.

Таким образом, недостаточная влагообеспеченность почвы в первые два летних месяца вегетации (таблица 1) сказывается на уменьшении численности представителей большинства анализируемых эколого-трофических групп микроорганизмов (таблица 2). Отмечено, что в

образцах необработанной инокулянт почвой, отобранной в июне, численность микроорганизмов выше или сопоставимо со значениями, полученными в мае, по большинству представителей зимогенной, олиготрофной, автохтонной и миксотрофно-синтетической экологических ниш. В июле более высокая численность сохранялась только по фосфатлитическим аэробным бактериям и микромицетам. С другой стороны, инокулянт «Ресойлер» при этих же метеорологических условиях, инициируя уменьшение численности представителей микроорганизмов многих основных экологических ниш, оказывает содействие в регулировании их количественного и качественного состава, тем самым способствуя увеличению устойчивости исследуемого агробиогеоценоза к негативным воздействиям внешней среды (рисунок 1).

**Заключение.** На основании выполненного микробиологического исследования инокулянта «Ресойлер», используемого в качестве прикорневой подкормки растений по всходам в фазе «выход в трубку» (в мае) на посевах озимой ржи, культивируемой на почве Гомельского региона республики, установлено: полученные значения эколого-трофических коэффициентов и индексов указывают на то, что обработка биопрепаратом при недостатке почвенной влаги в анализируемые летние месяцы содействует поддержанию устойчивости исследуемого агробиоценоза, поскольку он приобретает более стабильное состояние в отношении негативных воздействий со стороны антропогенных факторов, и что сближает его с естественными ценозами изучаемой почвенно-климатической зоны по сравнению с соответствующими контрольными образцами.

### Литература

1. Инокулянт микробиологический «Ресойлер», ж [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pesticity.by/regulatory-rosta-rastenij/inokulyant-mikrobiologicheskij-resojler-zh/>. – Дата доступа : 12.02.2023.
2. Шарова, М. Б. Морфолого-цитологическое изучение гриба *Trichoderma* Fr. в связи с производством препарата «триходермин» : автореф. дис... канд. биол. наук : 03.00.05 / М. Б. Шарова. – М. : МГУ, 1983. – 15 с.
3. Войтка, Д. В. Стандартизация препарата на основе грибов-антагонистов рода *Trichoderma* / Д. В. Войтка // Микробные биотехнологии : фундаментальные и прикладные аспекты : XII Междунар. конф., Минск, 7–11 июня 2021 / Э. И. Коломиец (председатель) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 120–121.
4. Эффективность применения биологических препаратов в агроценозе кормовых бобов в Беларуси / Ф. И. Привалов [и др.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series. – 2022. – Vol. 60, № 3. – P. 296–311.
5. Привалов, Ф. И. Достижения и проблемы селекции высокопродуктивных сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь / Ф. И. Привалов, Э. П. Урбан // Весці Нацыянальнай Акадэміі Навук Беларусі. – 2016. – № 3. – С. 41–49.
6. Растениеводство : учебник для вузов / Г. С. Посыпанов [и др.]. – М. : Изд-во «НИЦ ИНФРА-М», 2022. – 612 с.
7. Практикум по микробиологии / А. И. Нетрусов [и др.]. – М. : Академия, 2005. – 604 с.
8. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества : науч. метод. пособ. / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.
9. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта : с основами статистической обработки результатов исследований / Б. А. Доспехов. – М. : Книга по Требованию, 2013. – 349 с.
10. Селянинов, Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата / Г. Т. Селянинов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 165–177.
11. Ионова, Е. В. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы) / Е. В. Ионова, В. А. Лиховидова, И. А. Лобунская // Зерновое хозяйство России. – 2019. – № 6 (66). – С. 18–22.
12. Белгидромет [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://belgidromet.by/climatologu/view/klimatic>. – Дата доступа : 22.08.2023.
13. Погода в Гомеле [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://weatherarchive.ru/PogodaGomel>. – Дата доступа : 22.08.2023.

## Структура дубовых насаждений подзоны широколиственно-сосновых лесов

М.С. ЛАЗАРЕВА, Л.К. КЛИМОВИЧ

В статье приведена видовая, возрастная, типологическая структура дубовых насаждений подзоны широколиственно-сосновых лесов. Определены средние составы наиболее продуктивных типов дубовых лесов 1 класса возраста. Формирование целевых составов в дубравах и регулирование соотношения пород в древостоях начинается с момента смыкания крон при уходах за деревьями главной породы.

**Ключевые слова:** смешанные насаждения, дубравы, тип леса, рубки ухода, структура, смена пород.

The article presents the species, age, and typological structure of oak plantations in the broad-deciduous-pine forests subzone. The average compositions of the most productive types of oak forests of the 1st age class have been determined. The formation of target compositions in oak forests and the regulation of the ratio of species in stands begins from the moment the crowns are closed when caring for the trees of the main breed.

**Keywords:** mixed plantings, oak forests, type of forest, care cabins, structure, change of breeds.

**Введение.** Дубравы являются типичными представителями неморальной растительности широколиственных лесов Западной Европы. В последние годы отмечается упрощение структуры дубрав республики, снижается их устойчивость и продуктивность, наблюдается увеличение доли производных от дуба мелколиственных и грабовых насаждений. Площади, занятые дубравами, меньше потенциально возможных. Несмотря на целый ряд мер, направленных на увеличение доли дубрав, их количество увеличивается медленно. Одна из основных причин заключается в зарастании их мягколиственными породами. Проведение рубок ухода в таких насаждениях сопряжено с рядом технических и экономических трудностей. Важным является поиск рациональных лесоводственно-технологических решений при формировании дубрав с учетом лесорастительных условий.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследований являются смешанные дубовые насаждения различных типов леса, состава, возраста и продуктивности подзоны широколиственно-сосновых лесов Беларуси.

При изучении смешанных дубовых насаждений данные рассматривались в динамике. Анализировались естественные ряды развития древостоев, имеющие общность генезиса и лесорастительных условий. Для установления закономерностей формирования смешанных дубовых насаждений подбирались однородные участки, характеризующиеся идентичными почвенно-грунтовыми лесорастительными условиями –  $C_{2-3}$ – $D_{2-3}$ , типами леса и соответствующим характером изменения состава насаждений. Эти методологические положения послужили основой для исследований структуры, роста и формирования смешанных дубовых насаждений.

Экспериментальный материал представлен данными пробных площадей (ПП), заложенных в период 1985–2022 гг. в дубовых насаждениях. Выбор участков для заложения пробных площадей, размеры, отграничение и закрепление их, подготовка к учету и т. п. осуществлялись в соответствии с ТКП 622-2018 [1], методиками, принятыми в лесоводстве и таксации [2]–[5]. Общее количество объектов – более 200.

Проведена систематизация экспериментального материала, статистическая обработка данных и анализ статистик; установлены возрастная динамика таксационных показателей и взаимозависимости таксационных показателей по отдельным породам и их изменения в возрастной динамике; определены средние составы смешанных дубовых насаждений. Анализ материала проводился системно [6].

Целью данной работы является установление структуры, динамики роста и формирования дубовых насаждений подзоны широколиственно-сосновых лесов.

**Результаты и их обсуждение.** Для оценки современного состояния дубовых насаждений проведен сравнительный анализ основных показателей дубрав за последние семь деся-

тилетий. Данные прошлых лет представлены по работам И.Д. Юркевича [7], К.Б. Лосицкого [8], В.Ф. Багинского, Л.Д. Есимчика [9], отчетов о НИР (2001, 2009, 2017 и др.) и Государственного лесного кадастра [10].

Площади распространения дубрав Беларуси в XX–XXI столетиях неоднократно изменялись (таблица 1).

Таблица 1 – Площади распространения дубрав в лесном фонде Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь в период 1949–2022 гг.

Показатель	Годы										
	1949	1957	1966	1978	1983	1988	1994	2005	2010	2014	2022
Площадь, тыс. га	157,7	211,0	244,8	232,5	220,2	226,0	244,0	239,0	249,1	248,0	277,4
% от лесопокрытой площади по МЛХ	4,8	4,8	4,6	3,9	3,7	3,8	4,1	3,5	3,6	3,4	3,3

За 70-летний период площади дубовых насаждений увеличились более чем в 1,7 раза. Однако долевое участие дуба в составе лесов Минлесхоза снизилось и в настоящее время составляет 3,3 % от лесопокрытой площади. Средний возраст дубовых насаждений республики – 73 года, средний запас – 192 м<sup>3</sup>/га, запас спелых и перестойных дубовых насаждений составляет 242 м<sup>3</sup>/га, среднее изменение запаса – 3,0 м<sup>3</sup>/га.

Дубравы Беларуси имеют большое экологическое, экономическое и социальное значение и встречаются во всех категориях лесов. Меньшая часть площадей дубрав 7625,3 га (3 %) с запасом 1591,4 тыс. м<sup>3</sup> входит в состав рекреационно-оздоровительной категории лесов, средний возраст которых составляет 72 года. В составе защитной категории лесов дубравы занимают 36655 га (15 %) с запасом 6905 тыс. м<sup>3</sup> и средним возрастом – 77 лет. В природоохранных лесах площади дубовых насаждений составляют 43322,2 га (18 %) с запасом 8889,2 тыс. м<sup>3</sup> и средним возрастом 98 лет. Наиболее распространены дубравы в эксплуатационной категории лесов – 157714,5 (64 %) с запасом 157714,5 тыс. м<sup>3</sup> и средним возрастом 66 лет [10].

Одной из причин относительно низкой доли площади дубрав в лесах республики в анализируемый период является смена пород. Увеличение производных типов леса влечет за собой диспропорцию в структуре лесного фонда за счет уменьшения коренных дубовых насаждений и, в конечном итоге, снижение продуктивности и хозяйственной ценности лесов. Стратегическим планом развития лесохозяйственной отрасли Республики Беларусь на период с 2015 по 2030 гг. предусматривается увеличение долевого участия дубовой формации в лесопокрытой площади с 3,4 % до 4,7 % [11].

Климат Республики Беларусь в целом благоприятен для произрастания дубовых лесов [12]. Ожидаемое потепление климата должно положительно сказаться на росте дуба [13] как представителя неморальной флоры. В соответствии со Стратегией адаптации лесного хозяйства Республики Беларусь к изменению климата на период до 2050 г. [14] площадь дубрав может увеличиться на 53,1 % к 2050 г. преимущественно за счет орляковой, кисличной и снытевой серий типов леса. В этой связи, проблема поиска путей эффективного формирования дубрав становится особо актуальной, в первую очередь это относится к условиям подзоны широколиственно-сосновых лесов, где климатические условия наиболее благоприятны для выращивания этой породы [15], [16]. В этой подзоне почвы в целом беднее, чем в других подзонах, они имеют невысокое плодородие [17]. В то же время среди почв распространены тяжело-супесчаные и суглинистые почвы, где донная морена выступает к поверхности среди водно-ледниковых отложений [17].

На территории республики дубовые насаждения встречаются повсеместно, однако, как представитель неморальной флоры, дуб в большей степени приурочен к южной ее части. Более 46 % площади дубрав относятся к лесному фонду Гомельского ГПЛХО, 18 % – Брестского. К северу республики участие дуба в составе лесов сокращается.

Распределение дубовых лесов по территории геоботанических округов также неравномерно. В Бугско-Полесском геоботаническом округе доля дубовых насаждений от их общей площади составляет 15,9 % и в Полесско-Приднепровском – 32,7 %.

В настоящее время возрастная структура дубовых насаждений Беларуси не является оптимальной. Молодняки составляют около 20 % лесопокрытой площади, средневозрастные –

42 % (Гомельское ГПЛХО) и 51 % (Брестское), приспевающие – 14–16 % и спелые и перестойные – 13,7 % (Брестское ГПЛХО) и 24,2 % (Гомельское ГПЛХО) (рисунок 1).

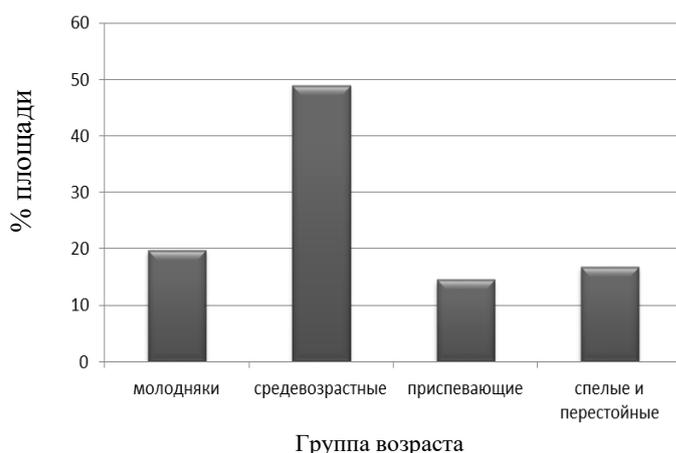


Рисунок 1 – Распределение площади дубовых насаждений по группам возраста

Типологическая структура дубрав и их распределение по геоботаническим подзонам описаны в литературе [7], [15]. Дубравы Беларуси характеризуются широким типологическим спектром. Разнообразие плакорных дубрав республики включает 7 типов леса, пойменных – 5, более 90 ассоциаций [18].

На рисунке 2 представлено распределение площади дубовых насаждений Беларуси по типам леса.

В составе дубрав республики преобладают кисличные (49 %), черничные (18 %), снытевые (10 %) и орляковые (9 %) типы дубовых лесов, которые, в основном, соответствуют типам лесорастительных условий С<sub>2-3</sub>–Д<sub>2-3</sub>.

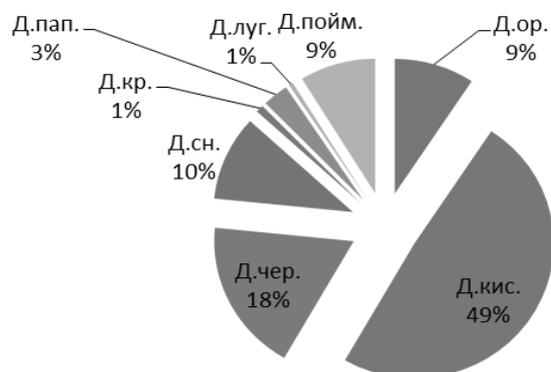


Рисунок 2 – Распределение площадей дубовых насаждений по типам леса

Однако распределение дубовых древостоев по типам леса имеет зональную обусловленность [19]. Переход к подзоне широколиственно-сосновых лесов выражен четко, что обусловлено эдафическими и орографическими факторами. В силу эдафических факторов черничные типы дубрав на юге Беларуси занимают 23–32 % площади дубовой формации региона, а при продвижении к северу доля их участия снижается до 4 %. В то же время снытевые и кисличные типы леса, наоборот, увеличивают распространение с юго-запада (Белорусское Полесье), где они занимают 6 % площади дубовой формации, к северу, где они представлены примерно на 1/3 площади дубовой формации региона (Белорусское Поозерье).

В лесном фонде каждого лесхоза соотношение типов дубовых лесов не одинаково. Планирование и проведение лесовосстановительных мероприятий, в том числе объемов лесных культур дуба, необходимо осуществлять с учетом зональности лесной растительности республики – эдафо-фитоценологических условий геоботанических подзон, округов и районов. Тем более, что в настоящее время лесоустройство в республике проводится на почвенно-лесотипологической ос-

нове. При таксации каждого выдела устанавливается номер почвенно-типологической группы (ПТГ). Это дает возможность лесоводам обоснованно планировать и проводить лесохозяйственные мероприятия, направленные на формирование насаждений с целевыми составами.

Дубовые фитоценозы представлены высоким уровнем биологического разнообразия. Более 80 % дубрав имеют смешанный состав, к чистым, как правило, относятся спелые и перестойные древостои.

Дубовые насаждения характеризуются большим разнообразием смешения древесных видов в составах и их динамичностью с возрастом. В составах дубрав может участвовать до 20 видов древесно-кустарниковых пород. Это обуславливает сложные ценоотические взаимоотношения в насаждении, угрозу нежелательной смены пород и большую вариабельность лесоводственно-таксационных показателей, что создает трудности при ведении хозяйства в них, в частности, при формировании целевых составов рубками ухода и при научных исследованиях этих древостоев.

Наибольшее внимание лесоводов уделяется молоднякам дуба, особенно 1 класса возраста, когда формируется состав будущей дубравы. В этот период без должного ухода за дубом и его породами-спутниками, к которым относятся клен, липа, вяз, ясень, вероятность нежелательной смены пород второстепенными древесными видами особенно велика. В лесхозах подзоны широколиственно-сосновых лесов в наиболее распространенных кисличных, орляковых, черничных, а также снытевых типах дубовых лесов были заложены пробные площади с различной долей участия дуба (2–10 единиц состава). Фотографии некоторых объектов представлены на рисунке 3 и 4.



Рисунок 3 – Дубрава орляковая (Козелужское лесничество Хойникского лесхоза, кв. 11, выд. 8)



Рисунок 4 – Дубрава кисличная (Речицкое лесничество Речицкого опытного лесхоза, кв. 6 выд. 14)

По материалам пробных площадей в наиболее продуктивных дубравах кисличных и снытевых типов леса рассчитаны средние составы по числу стволов и по запасу для молодняков 1 класса возраста в разрезе возрастных групп 5–10 лет и 11–20 лет (таблица 2).

Таблица 2 – Средние составы дубовых насаждений кисличного и снытевого типов леса

Геоботаническая подзона	Тип леса	Возраст, лет	Состав по числу стволов
			состав по запасу
Широколиственно-сосновых лесов	Д. кис.	До 10	$\frac{12Д2Лп11Г51Б12Ос12Олч+С}{8Д58Б23Олч6Ос5Г+Лп+С}$
	Д. кис.	11–20	$\frac{33Д2Я27Г27Б9Ос2Олч+В+Кл+Лп+С}{27Д1Я14Г43Б8Ос6Олч+В+Кл+С}$
	Д. сн.	До 10	$\frac{9Д1Я2Лп5Г49Б33Ос1Олч+Кл}{2Д6Г57Б34Ос1Олч+Кл+Я+Лп}$
	Д. сн.	11–20	$\frac{27Д7Я5Лп11Г27Б10Ос9Ив4Олч+Кл+С}{31Д11Я1Лп5Г25Б11Ос10Олч6Ив+Кл+С}$

В подзоне широколиственно-сосновых лесов в дубравах до 10 лет как в кисличном, так и в снытевом типах леса наблюдается очень активное возобновление и развитие мягколиственной части насаждений. Долевое участие мягколиственной группы пород составляет 75–83 % от общего числа стволов, твердолиственных видов – не превышает 8–13 % по числу стволов. В сложившейся ситуации смена дуба чаще всего на березу без своевременных и регулярных уходов за каждым деревом главной породы неотвратима.

К возрастному периоду 11–20 лет в результате проводимых уходов за дубом долевое участие мягколиственных видов снижается до 57 % в кисличных типах леса и 46 % – в снытевых, хотя еще является достаточно высоким и вероятность смены пород остается. Однако такое снижение обеспечивает участие дуба в количестве 3 единиц состава, а если учитывать суммарное значение твердолиственных видов, то это уже 42 % по запасу в дубравах кисличных и 48 % – в дубравах снытевых.

Формирование целевых, т. е. обеспечивающих преобладание дуба, составов в дубравах нередко приходится проводить практически на всех этапах лесовыращивания. Нередко к моменту окончания рубок ухода в насаждениях представлены мягколиственные виды в количестве 3 и более единиц состава. При проведении рубок ухода необходимо стремиться к вырубке осины до 40 лет, березы – к 60–70 годам.

Следует отметить, что речь идет о средних составах, анализ которых показывает эффективность проводимых производственными уходами. При этом необходимо помнить, что к каждому насаждению должен быть индивидуальный подход, т. к. помимо различий в лесорастительных условиях и возрасте каждая молодая дубрава характеризуется определенной густотой, сомкнутостью, соотношением пород, распределением главной породы по площади участка, соотношением высот главных и второстепенных древесных видов, давности проведения лесохозяйственных мероприятий и др.

Отличия между Бугско-Полесским и Полесско-Приднепровским геоботаническими округами по средним составам насаждений незначительны. В Бугско-Полесском лесорастительном районе отмечается больший процент участия в дубравах ольхи черной, а в Полесско-Приднепровском – березы и граба.

Динамика запасов дубовых насаждений республики за 70-летний период в разрезе групп возраста показано в таблице 3.

Таблица 3 – Распределение запаса по группам возраста в дубравах

Показатели	Молодняки		Средне-возрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные	Всего
	I класс	II класс				
Запас на 1.01.1994, млн. м <sup>3</sup>	0,88	6,86	12,68	8,08	5,42	33,92
%	2,59	20,22	37,39	23,82	15,98	100,00
Запас на 1.01.2022, млн. м <sup>3</sup>	0,99	2,49	25,99	8,34	9,35	47,16
%	2,10	5,28	55,11	17,68	19,83	100,00

Более 90 % запаса дубрав составляют средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные насаждения. Запас спелых дубрав не превышает 1/5 от общего объема древостоев. В лесном фонде Брестского ГПЛХО доля высокопродуктивных дубовых насаждений составляет 15 %, Гомельского ГПЛХО – 17 %.

Средняя полнота дубовых насаждений подзоны широколиственно-сосновых лесов варьирует в пределах 0,61–0,68. Встречаются дубравы с полнотой 0,3–1,0. При этом, как правило, большее долевое участие высокополнотных насаждений относится ко 2 классу возраста, а низкополнотных – к спелым и перестойным древостоям.

Таким образом, в подзоне широколиственно-сосновых лесов произрастает около 50 % всех дубрав, встречающихся в лесном фонде Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь. Дубовые древостои характеризуются широким типологическим спектром, но преобладают черничные, кисличные, орляковые и снытевые дубравы, которые занимают более 80 % площади.

Формирование целевых составов в дубравах начинается с момента массового возобновления мягколиственных видов и заглушения ими деревьев дуба, при этом необходимо формировать боковое отенение. Участие в составах дубрав мягколиственных пород на всех этапах лесовыращивания необходимо регулировать рубками ухода таким образом, чтобы к моменту окончания рубок ухода их оставалось в насаждении не более 1–2 единиц состава.

**Заключение.** За 70-летний период площади дубовых насаждений увеличились более чем в 1,7 раза. По состоянию на 01.01.2022 г. дубовые насаждения в лесном фонде Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь занимают 245,3 тыс. га, что составляет 3,3 % лесопокрытой площади.

В силу эдафических факторов черничные типы дубрав на юге Беларуси занимают 23–32 % площади дубовой формации региона, а при продвижении к северу доля их участия снижается до 4 %. Наиболее продуктивные типы дубовых лесов – снытевые и кисличные, наоборот, увеличивают распространение с юго-запада (6 % площади) к северу, где они представлены примерно на 1/3 площади дубовой формации региона. В настоящее время в подзоне широколиственно-сосновых лесов преобладают черничные, кисличные, орляковые и снытевые дубравы, которые занимают более 80 % площади.

В подзоне широколиственно-сосновых лесов долевое участие высокопродуктивных дубовых насаждений составляет в среднем 16 % от площади дубрав подзоны.

Возрастная структура дубрав южной подзоны остается неравномерной: молодняки занимают в среднем около 20 % лесопокрытой площади, средневозрастные – 46 %, приспевающие – 15 % и спелые и перестойные – около 19 %.

Анализ средних составов насаждений 1 класса возраста показывает эффективность проводимых производственными уходами.

## Литература

1. Технический кодекс установившейся практики. Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь : ТКП 622-2018 (33090). – Введ. 12.07.2018. – Минск : Минлесхоз РБ, 2018. – 96 с.
2. Сукачев, В. Н. Программа и методика биоценологических исследований / В. Н. Сукачев, Н. В. Дылис. – М. : Наука, 1966. – 118 с.
3. Справочник таксатора / В. С. Мирошников, О. А. Труль, В. Е. Ермаков [и др.] ; под общ. ред. В. С. Мирошникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Ураджай, 1980. – 360 с.
4. Методы изучения лесных сообществ. – СПб. : НИИХимии СПбГУ, 2002. – 240 с.
5. Уткин, А. И. Изучение лесных биогеоценозов / А. И. Уткин // Программа и методика биогеоценологических исследований. – М. : Наука, 1974. – С. 281–317.
6. Багинский, В. Ф. Лекции по системному анализу для лесоводов / В. Ф. Багинский. – Брянск : БГИТА, 1997. – 157 с.
7. Юркевич, И. Д. Дубравы БССР / И. Д. Юркевич. – Минск : АН БССР, 1960. – 271 с.
8. Лосицкий, К. Б. Дубравы Белорусской ССР / К. Б. Лосицкий // Дубравы СССР. – М.–Л. : Гослесбумиздат, 1952. – Т. IV. – С. 3–73.
9. Багинский, В. Ф. Лесопользование в Беларуси / В. Ф. Багинский, Л. Д. Есимчик. – Минск : Беларуская навука, 1996. – 367 с.
10. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь : по состоянию на 1.01.2022 г. / М-во лесного хозяйства Респ. Беларусь ; Лесоустроительное республиканское унитарное предприятие «Белгослес». – Минск, 2022. – 90 с.

11. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 гг. : утв. зам. Премьер-министра РБ от 23.12.2014 г., № 06/201-271. – Минск, 2015. – 20 с.
12. Юркевич, И. Д. Рациональное изменение состава лесов Белоруссии / И. Д. Юркевич, В. С. Гельтман // Лесное хозяйство. – 1963. – № 10. – С. 5.
13. Лапицкая, О. В. Эколого-экономические основы определения спелости леса : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / О. В. Лапицкая. – Минск : БГТУ, 2001. – 21 с.
14. Стратегия адаптации лесного хозяйства Республики Беларусь к изменению климата на период до 2050 года. – Минск : МЛХ, 2011. – 119 с.
15. Юркевич, И. Д. География, типология и районирование лесной растительности Белоруссии / И. Д. Юркевич, В. С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1965. – 288 с.
16. Юркевич, И. Д. Естественное и искусственное возобновление дуба в БССР / И. Д. Юркевич. – Минск : Госиздат БССР, 1954. – 36 с.
17. Роговой, П. П. Почвы БССР / П. П. Роговой. – Минск : АН БССР, 1952. – 270 с.
18. Юркевич, И. Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах / И. Д. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 120 с.
19. Лазарева, М. С. Особенности распространения и типологическая структура дубовых насаждений Беларуси в разрезе лесорастительных районов / М. С. Лазарева, Т. Л. Барсукова // Труды БГТУ. – 2009. – Вып. XVIII. – С. 130–133.

Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 08.09.2023

## Фауна пиявок (Hirudinea: Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) малых рек Минской возвышенности

А.И. МАКАРЕНКО<sup>1</sup>, М.Д. МОРОЗ<sup>2</sup>

Рассмотрены результаты исследований пиявок (Hirudinea: Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) малых рек Минской возвышенности. Обнаружено 11 видов пиявок, относящихся к 2 отрядам (Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) и входящих в состав 4 семейств: Glossiphoniidae – 6 видов; Piscicolidae – 1; Hirudinidae – 1; Erpobdellidae – 3 вида. Обнаружены охраняемые и редкие в некоторых странах Европы виды пиявок. К ним относятся *Erpobdella nigricollis* (Brandes, 1900) и *Dina lineata* (O.F. Müller, 1774). Сделан вывод о том, что малые реки Минской возвышенности могут служить важным естественным рефугиумом для пиявок Средней и Восточной Европы.

**Ключевые слова:** реки, фауна, пиявки, видовая структура, редкие и охраняемые виды, Беларусь.

The leeches (Hirudinea: Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) of small rivers of the Minsk upland were studied. 11 species of leeches belonging to two orders (Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) and four families were revealed: Glossiphoniidae – 6 species; Piscicolidae – 1; Hirudinidae – 1; Erpobdellidae – 3. The species of leeches that are protected and rare in some European countries have been discovered. *Erpobdella nigricollis* (Brandes, 1900) and *Dina lineata* (O.F. Müller, 1774) are inclined to them. It is concluded that the small rivers of the Minsk upland can serve as an important natural refuge for leeches of Central and Eastern Europe.

**Keywords:** rivers, fauna, leeches, species structure, rare and protected species, Belarus.

**Введение.** Пресноводные пиявки играют существенную роль в трансформации вещества и энергии в водоемах. Они встречаются во всех типах континентальных водоемов, кроме пересыхающих. Большую часть жизни они проводят в пассивном состоянии, поджидая или переваривая пищу. Часть пиявок являются хищниками, питаются олигохетами, водными насекомыми и особенно личинками хирономид. Некоторые виды превращаются в эндопаразитов позвоночных животных, заползая, например, в глотку и дыхательное горло теплокровных животных, паразитируют также на земноводных и рептилиях. В свою очередь, пиявки составляют определенную часть рациона некоторых бентосоядных видов рыб, земноводных и птиц. Эти водные беспозвоночные являются переносчиками паразитических жгутиконосцев – паразитов крови рыб, промежуточными хозяевами плоских червей и сами могут вызывать заболевания рыб [1].

Необходимо признать, что в настоящее время базовых данных о видовом составе и численности этой группы водных беспозвоночных животных, обитающих в водоемах Беларуси, недостаточно [2]–[4] или они фрагментарны, что и определило цель наших исследований.

**Цель:** выявление таксономической структуры сообщества макрозообентоса, определение видового состава и доли охраняемых видов в малых реках Минской возвышенности.

**Объект, материалы и методы исследования.** Минская возвышенность находится на востоке Западно-Белорусской провинции и является самой высокой частью Беларуси. Она протянулась с запада на восток на 143 км, с севера на юг – более чем на 180 км. Преобладающие высоты 200–300 м, относительные превышения над прилегающими территориями составляют более 150 м. По территории возвышенности проходит водораздел рек бассейнов Чёрного (притоки рек Припяти и Днепра) и Балтийского морей (притоки рек Вилии и Немана). Распространены крупные массивы сосновых лесов, встречаются широколиственно-еловые, еловые леса. Поймы рек и ложбины стока заняты участками суходольных и пойменных лугов, болот. Характерны холмисто-моренно-эрозионные ландшафты, встречаются камово-моренные, вторичноморенные, водно-ледниковые речные долины [5]–[6].

Сборы, послужившие материалом для данного сообщения, были проведены в апреле-октябре 2020–2021 гг. в прибрежной части рек на глубине в среднем до 0,5–0,7 м. Пробы отбирались с использованием стандартного гидробиологического сачка (25 × 25 см, 500 µm). Методика отбора проб проведена согласно Европейскому протоколу AQEM и стандарту ISO 7828.

На каменистых грунтах и в местах развития макрофитов производился ручной сбор материала, который предполагал выемку камней, коряг и прибрежной растительности с их последующим осмотром и отбором выявленных животных. За время исследований было собрано и проанализировано порядка 80 проб.

Образцы исследуемого материала помещали в герметичные пластиковые емкости, после чего проводилась их предварительная фиксация 10 %-ным раствором формалина или 70 %-ным раствором этилового спирта.

Отобранные пробы обрабатывали в лабораторных условиях с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10 при увеличении от  $\times 8$  до  $\times 56$ , доработанного автором согласно запатентованному образцу [7]–[8]. При этом за счет манипулирования освещением значительно улучшалось качество проведения микроскопических работ.

Анализируемые образцы отбирались на створах следующих рек [9]:

1. р. Гуйка, окрестности (окр.) д. Рогова (Минский р-н), басс. р. Виляя. Длина 19 км, площадь водосбор 98 км<sup>2</sup>, средний уклон водной поверхности 3,3 ‰.

2. р. Вязынка, окр. п. Радошковичи (Молодечненский р-н), басс. р. Виляя. Длина 15 км, площадь водосбора 60 км<sup>2</sup>, средний расход воды в устье 0,4 м<sup>3</sup>/сек. От верховий и до п. Радошковичи образован заказник местного значения «Река Вязынка» для охраны ручьевой форели.

3. р. Удра, окр. д. Удранка (Молодечненский р-н), басс. р. Виляя. Длина 26 км, площадь водосбора 188 км<sup>2</sup>, средний уклон 4,0 ‰. Протекает через лес в пределах Минской возвышенности.

4. р. Конотопка, окр. д. Будьки (Вилейский р-н), басс. р. Виляя. Длина 15 км, площадь водосбор 56 км<sup>2</sup>, средний уклон 4,2 ‰. Течет по лесистым склонам Минской возвышенности. Обитает ручьевая форель.

5. р. Ратынце, окр. д. Пережеры (Воложинский р-н), басс. р. Неман. Длина 8 км. Течет в границах Минской возвышенности. Отмечена ручьевая форель, заходящая из р. Исlochь.

6. р. Выгоничанка, окр. д. Выгоничи (Воложинский р-н), левый приток р. Исlochь, басс. р. Неман. Длина 10 км, площадь водосбора 36 км<sup>2</sup>, средний уклон 9,9 ‰. От д. Выгоничи до устья течет через лес по глубоко врезанной долине. Встречается ручьевая форель.

7. р. Яршевка, в районе моста трассы Гродно–Минск (Воложинский р-н), правый приток р. Исlochь (басс. р. Неман). Длина 30 км, площадь водосбора – 225 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход воды в устье – 1,76 м<sup>3</sup>/с, средний уклон 1,4 ‰.

8. р. Исlochь, окр. д. Михалово (Воложинский р-н), левый приток р. Березины, басс. р. Неман. Длина 102 км, площадь водосбор 1330 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход воды в устье 10 м<sup>3</sup>/с, средний уклон 1,9 ‰. Русло умеренно извилистое, зарегулировано 3 плотинами. Одна из немногих рек Беларуси, в которой существует устойчивая популяция ручьевой форели.

9. р. Цецеровка, окр. д. Галимцы (Воложинский р-н), левый приток р. Исlochь, басс. р. Неман. Длина 10 км, площадь водосбора – 26 км<sup>2</sup>, средний уклон 10,0 ‰. Из р. Исlochь заходит ручьевая форель.

10. р. Волма, окр. д. Липовая Колода (Минский р-н), левый приток р. Свисlochь, басс. р. Днепр. Длина 103 км, площадь водосбор 1150 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход воды в устье 6,7 м<sup>3</sup>/с, средний уклон 0,5 ‰. Пойма на большом протяжении осушена и распаханна, в верхнем течении 4 платины.

11. р. Глебовка, окр. д. Глебовковичи (Минский р-н), правый приток р. Волма, басс. р. Днепр. Длина 7 км. Русло канализировано на всем протяжении. По берегам реки преобладает лес.

12. р. Усяжа, в окр. мост на трассе Минск–Логойск (Минский р-н), правый приток р. Гайна, басс. р. Днепр. Длина 45 км, площадь водосбор 473 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход воды в устье 3,2 м<sup>3</sup>/с, средний уклон 1,1 ‰. В среднем и нижнем течении река принимает сток из мелиоративных каналов.

**Результаты и их обсуждение.** Проведенные исследования малых рек Минской возвышенности позволили выявить 12 низших определяемых таксонов (НОТ) пиявок [10], относящихся к 2 отрядам (*Rhynchobdellida*, *Arhynchobdellida*) и входящих в состав 4 семейств: *Glossiphoniidae* – 6 видов; *Piscicolidae* – 1; *Hirudinidae* – 1; *Ergobdellidae* – 5 видов (таблица 1). До вида было определено 11 таксономических элементов.

Среди выявленных пиявок доминирующим видом оказалась *E. octoculata* – 72 экз. (45,86 % относительной численности от всех собранных пиявок), а субдоминантом – *G. complanata* – 47 экз. (29,94 %, соответственно). Эти виды характеризуются широкой экологической пластичностью и поэтому могут обитать в разнообразных текучих и стоячих водоемах. Питаются *E. octoculata* и *G. complanata* мелкими водными беспозвоночными животными – моллюсками, олигохетами, личинками насекомых, мелкими пиявками, икрой рыб [3].

Необходимо также отметить, что эти виды являются достаточно обычными в различных водоемах Беларуси. Нами и раньше отмечалось их доминирование в некоторых реках [3]–[4].

Таблица 1 – Таксономический состав и количество пиявок, коллектированных в малых реках Минской возвышенности

№ п/п	Таксон	Створы*, экз.												Всего, экз.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Отр. Rhynchobdellida														
Сем. Glossiphoniidae														
1	<i>Glossiphonia complanata</i> (Linnaeus, 1758)			14	6	2			5	1		7	12	47
2	<i>Glossiphonia concolor</i> (Apathy, 1888)						1							1
3	<i>Glossiphonia heteroclita</i> (Linnaeus, 1761)									1	1			2
4	<i>Helobdella stagnalis</i> (Linnaeus, 1758)		2	4		2			1			4		13
5	<i>Hemiclepsis marginata</i> (O.F. Müller, 1774)											1		1
6	<i>Theromyzon tessulatum</i> (O.F. Müller, 1774)					5								5
Сем. Piscicolidae														
7	<i>Piscicola geometra</i> (Linnaeus, 1761)											1		1
Отр. Arhynchobdellida														
Сем. Hirudinidae														
8	<i>Haemopsis sanguisuga</i> (Linnaeus, 1758)	1											2	3
Сем. Erpobdellidae														
9	<i>Dina lineata</i> (O.F. Müller, 1774)				2									2
10	<i>Erpobdella nigricollis</i> (Brandes, 1900)	4				3			2					9
11	<i>Erpobdella octoculata</i> (Linnaeus, 1758)	5	1	8	12	19		1	1	2		23		72
12	<i>Erpobdella sp.</i>						1	1			1			2
	Число видов и форм (HOT)	3	2	3	3	5	2	2	4	3	3	5	1	12
	Число экземпляров	10	3	26	20	31	2	2	9	4	3	37	12	157

Примечание: \* – 1 – р. Гуйка; 2 – р. Вязьнка; 3 – р. Удра; 4 – р. Конотопка; 5 – р. Ратынце; 6 – р. Выгоничанка; 7 – р. Яршевка; 8 – р. Исlochь; 9 – р. Цецеровка; 10 – р. Волма; 11 – р. Глебовка; 12 – р. Усяжа.

Среди выявленных видов необходимо отметить голарктический вид *T. tessulatum*. Это одна из немногих пиявок, которая способна обитать в полярных широтах (выше 70°N) [1]. *T. tessulatum* является экзопаразитом водоплавающих и редко других видов птиц, у которых сосет кровь из слизистых оболочек ротовой полости и верхних дыхательных путей [3].

*H. marginata* распространена в Евразии, является экзопаразитом рыб и земноводных (тритонов и головастиков бесхвостых амфибий) [3].

Ряд выявленных нами видов пиявок входят в национальные Красные книги или Красные списки ряда стран Европы. К ним относятся – *E. nigricollis* и *D. lineata* [11]–[12].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в малых реках Минской возвышенности сложилась относительно богатая фауна пиявок. Некоторые её представители являются редкими или охраняемыми видами в ряде стран Европы.

Также можно отметить, что малые реки Минской возвышенности могут служить важным естественным рефугиумом для пиявок Средней и Восточной Европы.

Авторы выражают глубокую признательность В.П. Семенченко за поддержку и советы в проведении исследований.

**Заключение.** Проведенные исследования малых рек Минской возвышенности позволили выявить 12 низших определяемых таксонов (HOT) пиявок, относящихся к 2 отрядам (Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) и входящих в состав 4 семейств: Glossiphoniidae – 6 видов; Piscicolidae – 1; Hirudinidae – 1; Erpobdellidae – 5 видов. До вида было определено 11 таксономических элементов.

Наиболее многочисленными видами являлись *E. octoculata* и *G. complanata*, проявляющие эвритопные свойства и нападающие на мелких водных беспозвоночных. Нами и раньше отмечалось их доминирование в некоторых реках.

Обнаружены охраняемые в ряде стран Европы виды пиявок. К ним относятся *E. nigricollis* и *D. lineata*.

Сделан вывод о том, что малые реки Минской возвышенности могут служить важным естественным рефугиумом для пиявок Средней и Восточной Европы.

### Литература

1. Лукин, Е. И. Пиявки пресных и солоноватых водоемов. Фауна СССР. Пиявки / Е. И. Лукин – Л. : Наука, 1976. – Т. 1. – 484 с.
2. Нагорская, Л. Л. Пиявки (Hirudinea) пойменных водоемов реки Припять / Л. Л. Нагорская // Экологические проблемы Полесья и сопредельных территорий : мат. IV Межд. н.-пр. конф., Гомель, октябрь 2002 г. / Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. Н. Кусенков (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2002. – С. 179–180.
3. Мороз, М. Д. Пиявки (Hirudinea) озер Березинского биосферного заповедника / М. Д. Мороз, В. В. Кормаз // Вестн. БГУ. – 2005. – № 3. – С. 62–65.
4. Мороз, М. Д. Фауна пиявок (Hirudinea: Rhynchobdellida, Arhynchobdellida) реки Неман и ее притоков / М. Д. Мороз, Т. П. Липинская // Весці НАН Беларусі. – 2017. – № 3. – С. 55–60.
5. География Белоруссии / В. А. Дементьева (ред.) [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа, 1977. – 320 с.
6. Энциклопедия природы Беларусі : у 5-і т. / Рэдкал.: І. П. Шамякін (гал, рэд.) [і інш.]. – Мінск : БелСЭ, 1985. – Т. 3. – 599 с.
7. Осветительная установка для микроскопа бинокулярного стереоскопического : полез. модель ВУ 10705 / А. И. Макаренко, В. В. Вежновец, Т. В. Макаренко. – Оpubл. 30.06.2015.
8. Светодиодное устройство освещения микроскопической техники с изменяемым спектром свечения : полез. модель ВУ 10668 / А. И. Макаренко, Т. В. Макаренко. – Оpubл. 30.06.2015.
9. Блакітная кніга Беларусі / Н. А. Дзісько (ред.) [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1994. – 415 с.
10. Баканов, А. И. Использование характеристик разнообразия зообентоса для мониторинга состояния пресноводных экосистем / А. И. Баканов // Мониторинг биоразнообразия. – М., 1997. – С. 278–282.
11. Jażdżewska, T. Pijawki (Hirudinea). / T. Jażdżewska, J. Wiedeńska // Czerwona lista zwierząt ginących i zagrożonych w Polsce. In: Głowaciński Z. – Krakow : Instytut Ochrony Przyrody PAN, 2002. – S. 144–145.
12. Sket, B. Rdeči seznam ogroženih pijavk (Hirudinea) v Sloveniji / B. Sket // Varstvo narave. – 1992. – Vol. 17. – P. 177–178.

<sup>1</sup>Гомельский государственный  
медицинский университет

<sup>2</sup>Научно-практический центр  
НАН Беларуси по биоресурсам

Поступила в редакцию 22.09.2023

## Особенности накопления $^{137}\text{Cs}$ в компонентах надземной фитомассы березовых насаждений на территории дальней зоны чернобыльских выпадений в условиях изменения уровня грунтовых вод

А.М. ПОТАПЕНКО<sup>1</sup>, А.К. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, Н.В. МИТИН<sup>2</sup>, Н.В. ТОЛКАЧЕВА<sup>1</sup>, И.А. МАШКОВ<sup>1</sup>

На величину накопления  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах надземной фитомассы березовых насаждений оказывает влияние тип почвы и особенно её режим увлажнения. При произрастании в условиях повышенного увлажнения почвы деревья березы фактически способны как минимум двукратно увеличивать накопление  $^{137}\text{Cs}$ , при этом уровень его содержания на гидроморфных торфяных почвах имеет меньшую зависимость от плотности загрязнения радионуклидом, чем от глубины залегания грунтовых вод по сравнению с автоморфной минеральной почвой.

**Ключевые слова:** березовые насаждения, компоненты фитомассы, радиоактивное загрязнение,  $^{137}\text{Cs}$ , уровень грунтовых вод.

The amount of  $^{137}\text{Cs}$  accumulation in components of aboveground phytomass of birch plantations is influenced by soil type and especially by its moisture regime. When growing in conditions of increased soil moisture, birch trees are actually able to increase  $^{137}\text{Cs}$  accumulation at least twofold, while the level of its content in hydromorphic peat soils has a lower dependence on the density of radionuclide contamination than on the depth of groundwater occurrence compared to automorphic mineral soil.

**Keywords:** birch plantations, phytomass components, radioactive contamination,  $^{137}\text{Cs}$ , groundwater level.

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь проблема радиоактивного загрязнения земель остается одной из актуальных. Спустя 36 лет после катастрофы на Чернобыльской АЭС остаются радиоактивно загрязненными 15,6 % (1502,9 тыс. га) площади лесов [1]. Скорость снижения радиоактивного загрязнения территории лесного фонда за счет радиоактивного распада составляет 2,1–2,2 % в год. Аналогично (до 2 % в год) снижается мощность дозы  $\gamma$ -излучения как за счет радиоактивного распада, так и за счет вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  вглубь в подстильно-почвенном комплексе.

Эколого-биологические особенности лесных экосистем обуславливают сложный характер поведения в них радионуклидов. На перераспределение накапливаемых радионуклидов в компонентах лесных фитоценозов оказывают влияние видовые особенности отдельных древесных и кустарниковых пород, изменение эдафических факторов и ряд других причин [2], [3].

В связи с тем, что значительная часть лесных земель, загрязненных радионуклидами, имеет избыточное увлажнение, происходящие в настоящее время климатические изменения, выраженные в снижении уровня грунтовых вод, оказывают существенное влияние на миграцию радионуклидов в почвах и переход их в растения. Установлено, что более высокая удельная радиоактивность древесины при одной и той же плотности загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  наблюдается во влажных типах леса на оподзоленных песчаных и торфяно-глеевых почвах [4]. Например, для сосны обыкновенной, в зависимости от гетерогенности среды, в лишайниковом, мшистом и черничном типах леса установлено 1,5–3-х кратное различие в накоплении радионуклида при одинаковом уровне загрязненности почвы [4]–[5]. Причем повышенный уровень накопления происходит в более влажных условиях местопроизрастания.

Исследования 1990–2000 гг. на лесных гидроморфных почвах, проводимые в Институте леса НАН Беларуси, показали реальную возможность снижения корневого потребления радионуклидов посредством направленного воздействия на режим питания древесных растений [6], [7]. Результаты исследований свидетельствовали о различном характере накопления радионуклидов в зависимости от древесной породы и типа леса при различной водообеспеченности и плодородии почвы. В то же время отсутствуют сведения о миграции радионуклидов в лесных насаждениях различных типов леса в условиях изменяющегося климата, сопровождающегося изменением уровня грунтовых вод.

Согласно проведенным ранее исследованиям [8]–[11], при более высоком уровне увлажнения миграция радионуклидов в лесном фитоценозе существенно увеличивается: как вглубь почвенного профиля, так и в системе «почва-растение». Это обусловлено, в первую очередь, увеличением подвижности и биологической доступности радионуклида, стоком его наиболее миграционно способных форм в составе почвенной влаги в микропонижениях рельефа, а также увеличением потребления питательных элементов растениями в результате оптимизации условий их произрастания. В то же время представляют интерес особенности динамики этого процесса при резком изменении гидрологического режима в результате вторичного подтопления ранее мелиорированных территорий.

Знание факторов, оказывающих максимальное воздействие на потребление радионуклидов древесными растениями, позволит прогнозировать загрязненность лесной продукции радионуклидами на территориях, подвергшихся резкому изменению гидрологического режима как в настоящий момент времени, так и в более отдаленный период. Кроме того, только на основе сведений о воздействии различных почвенных параметров на накопление радионуклидов древесными растениями возможно разработать способы воздействия на них с целью снижения аккумуляции радиоактивных элементов растениями, определить оптимальные показатели для выращивания более чистой древесины в условиях радиоактивного загрязнения при различных гидрологических режимах.

**Объекты и методы исследования.** Объектами исследований являлись чистые и смешанные березовые насаждения III–V классов возраста, произрастающие на радиоактивно загрязненных территориях Ветковского спецлесхоза и Ельского лесхоза Гомельской области на дерново-подзолистых и мелиорированных торфяных почвах. Суть исследования состояла в определении накопления  $^{137}\text{Cs}$  надземной фитомассой березняков в зависимости от изменения условий увлажненности почвы.

Для исследований были выбраны насаждения, произрастающие в распространенных типах лесорастительных условий (ТЛУ): В<sub>2</sub>, А<sub>3</sub>, В<sub>3</sub>, А<sub>4</sub>, В<sub>4</sub>. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  в фитомассе деревьев березы устанавливалось по следующим компонентам: кора, древесина (без коры), 1- и 2-летние побеги, листья. Увлажненность почв под насаждениями устанавливалась по уровню грунтовых вод (УГВ).

Всего было заложено 6 объектов в естественных насаждениях, произрастающих на гидроморфных торфяных и торфянистых почвах, подстилаемых связным песком, которые ранее были мелиорированы посредством обустройства осушительной сети. В качестве контроля был заложен 1 объект на автоморфной минеральной почве, который примыкает к старой мелиоративной канаве. Для оценки степени увлажненности почвы на каждом объекте были обустроены колодцы в трехкратной повторности на разном удалении от осушительного канала – 25 м, 50 м и 75–100 м, в которых учитывался УГВ в течении вегетационного сезона.

Отбор проб компонентов фитомассы березы осуществлялся в конце осеннего периода с деревьев, располагающихся на таком же расстоянии от осушительного канала, как и колодцы. В каждом случае отбор проб проводился с 3 модельных деревьев, относящихся к I–II классу роста по Крафту. Объем проб каждого компонента составлял не менее 2,0 дм<sup>3</sup>.

Также на участках были отобраны пробы почвы для определения плотности загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  и миграции его по вертикальному профилю. Отбор почвы в ТЛУ В<sub>2</sub> проводился по 1-см слоям в глубину до 10 см и далее по 5-см слоям на глубину 20 см, а в более влажных ТЛУ – по 5-см слоям на глубину 55 см. При этом диаметр пробоотборников почвы составлял, соответственно, 50 мм и 140 мм.

Измерение активности  $^{137}\text{Cs}$  выполнялось методом регистрации гамма-излучения сцинтилляционным блоком детектирования на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315, нижний предел измерения которого составляет – 2 Бк/кг, с допускаемой основной относительной погрешностью измерения  $\pm 20\%$ .

Уровни накопления  $^{137}\text{Cs}$  надземной фитомассой березы на исследуемых объектах, имеющих разную плотность загрязнения радионуклидом, анализировались по коэффициентам перехода ( $K_p$ ) радионуклида из почвы в компоненты древесной растительности.

Коэффициент перехода  $^{137}\text{Cs}$  определялся по формуле:

$$K_{\text{п}} = U_{\text{А}_k} / \text{Пз} \text{ (Бк} \cdot \text{кг}^{-1} / \text{кБк} \cdot \text{м}^{-2}\text{)}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{А}_k}$  – удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в компоненте фитомассы березы, Бк/кг, Пз – плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м<sup>2</sup>.

**Результаты и их обсуждение.** По состоянию на 2022 г. плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  на опытных участках варьировала в пределах  $2,4 \div 11,2 \text{ Ки/км}^2$  ( $88,5 \div 413,7 \text{ кБк/м}^2$ ), а на контроле  $-18,2 \div 20,7 \text{ Ки/км}^2$  ( $674,7 \div 764,8 \text{ кБк/м}^2$ ). Загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  компонентов фитомассы березы на участках показало неоднозначное накопление радионуклида в растительных элементах в зависимости от его поверхностного загрязнения. Так, например, при разной плотности загрязнения уровни накопления  $^{137}\text{Cs}$  в таком компоненте, как древесина, который накапливает радионуклид в течение всего периода его корневого поступления, показывают, что на участках с гидроморфными и автоморфными почвами формируются две разноплановые группы по особенностям накопления радионуклида (рисунок 1).

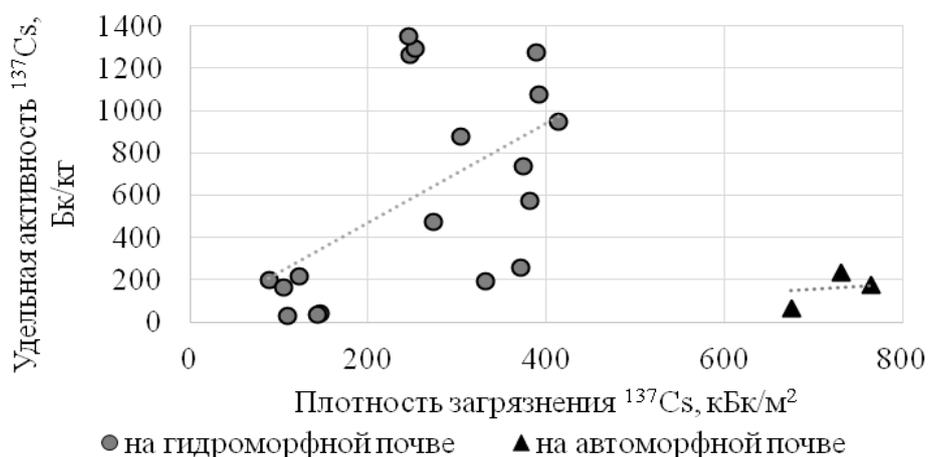


Рисунок 1 – Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в древесине березы в зависимости от плотности загрязнения на участках исследований

Корреляционный анализ данных, полученных на исследуемых участках (без контроля), показал, что взаимосвязь содержания  $^{137}\text{Cs}$  в надземной фитомассе березы с уровнем его поверхностного загрязнения почвы имеет умеренную корреляцию ( $r_s = 0,53 \div 0,72$ ;  $p \leq 0,025$ ). Данное обстоятельство указывает на присутствие других факторов, значительно влияющих на уровень загрязнения радионуклидом надземной фитомассы березы.

К особенностям распределения радионуклида в надземной фитомассе березы следует отнести то, что накопление  $^{137}\text{Cs}$  в древесине по сравнению с другими компонентами фитомассы, как минимум, в 2 раза ниже. Наибольшее содержание радионуклида наблюдается в побегах однолетних и листьях березы, что указывает на высокую биологическую особенность концентрирования радионуклида в элементах годовой вегетации.

Как следует из рисунка 2, накопление  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах фитомассы березы увеличивается в следующем порядке: древесина < кора < побеги двухлетних < побеги однолетних < листья, при этом активность радионуклида в компонентах в среднем определяется соотношением – 1:3,8:5,2:9,9:11,8, соответственно, что свидетельствует о биологической особенности распределения радионуклида в элементах надземной фитомассы при корневом потреблении  $^{137}\text{Cs}$  древесными растениями в постчернобыльский период. Приведенное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах березы фактически согласуется с более ранними исследованиями, в которых также отмечался наиболее высокий уровень радионуклида в физиологически активных ассимилирующих органах текущего года [4].

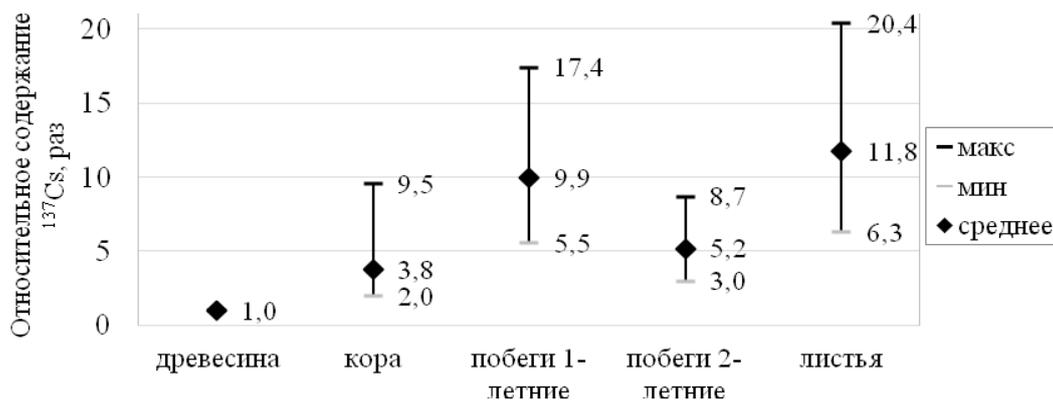


Рисунок 2 – Уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах фитомассы березы относительно её древесины

Необходимо также отметить, что варьирование распределения радионуклида в наземных компонентах фитомассы березы на объектах исследования имеет довольно широкий диапазон. Так, максимальные и минимальные активности  $^{137}\text{Cs}$  в коре, побегах однолетних и листьях березы относительно древесины имеют трехкратный и более разброс значений (рисунок 2). При этом следует учитывать, что параметры загрязнения березы радионуклидом определялись как средняя величина значений, полученных от трех модельных деревьев, поэтому фактический разброс данных по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах березы ещё больше.

Как и в предыдущих исследованиях [6], [7], анализ влияния типов лесорастительных условий на уровень накопления  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах фитомассы березы показал на наличие существенного их воздействия ( $p < 0,0001$ ), что вполне очевидно указывает на значимые отличия почв участков с березовыми насаждениями с разными по трофности и влажности.

Оценка влияния влагообеспеченности почвы на миграцию  $^{137}\text{Cs}$  в наземную фитомассу березовых насаждений, которые произрастают на разной удаленности от осушительного канала показала, что в целом по всем исследуемым участкам взаимосвязи накопления радионуклида в компонентах фитомассы березы и расстояния от канала до модельных деревьев не оказалось, но при рассмотрении по отдельным участкам, были получены однозначные результаты. Так, на трех объектах присутствовало достоверное снижение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в наземной фитомассе при увеличении расстояния от канала до модельных деревьев, а на одном объекте – повышение (таблица 1).

Таблица 1 – Корреляционный анализ связи содержания  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах фитомассы модельных деревьев березы и их удаленности от осушительного канала

Наименование объекта	Коэффициент корреляции ( $r_p$ ) / его значимость ( $p$ )				
	компоненты фитомассы				
	древесина	кора	побеги однолетние	побеги двухлетние	листья
Морозовка-2	<u>0,127</u>	<u>0,809</u>	<u>0,704</u>	<u>0,412</u>	<u>0,095</u>
	0,744	0,008	0,034	0,271	0,808
Морозовка-3	<u>-0,773</u>	<u>-0,411</u>	<u>-0,669</u>	<u>-0,928</u>	<u>-0,591</u>
	0,015	0,272	0,049	0,000	0,094
Морозовка-4	<u>-0,695</u>	<u>-0,792</u>	<u>-0,843</u>	<u>-0,890</u>	<u>-0,935</u>
	0,038	0,011	0,004	0,001	<0,001
Кузьмич (контроль)	<u>-0,832</u>	<u>-0,741</u>	<u>-0,824</u>	<u>-0,835</u>	<u>-0,824</u>
	0,005	0,022	0,006	0,005	0,006

Данное обстоятельство предполагает, что при определенных условиях водного режима в почве березовых насаждений происходит активное разложение опада в подстилочном слое почвы и последующая миграция легкодоступных форм  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемые слои, что, очевидно, обеспечивает интенсивный переход радионуклида в системе «почва – древесная растительность». Предыдущими исследованиями было отмечено, что тип почвы и ее гидрологический режим в большей степени обуславливают накопление радионуклида в древесостое [8], [9].

Влияние типа почвы на миграцию радионуклида наблюдается при сравнении распределения  $^{137}\text{Cs}$  по почвенным слоям на гидроморфной торфяной и автоморфной минеральной почвах на участках исследований. Так, установлено, что на торфяной почве 50 % запаса радионуклида в почве расположено в 2 раза глубже, по сравнению с минеральной (рисунок 3). Такое отличие, очевидно, проявляется из-за особенности структурного состава торфяной почвы и свойственной ей высокой гидрофильностью и влагоемкостью, которые положительно влияют на миграционные свойства  $^{137}\text{Cs}$ .

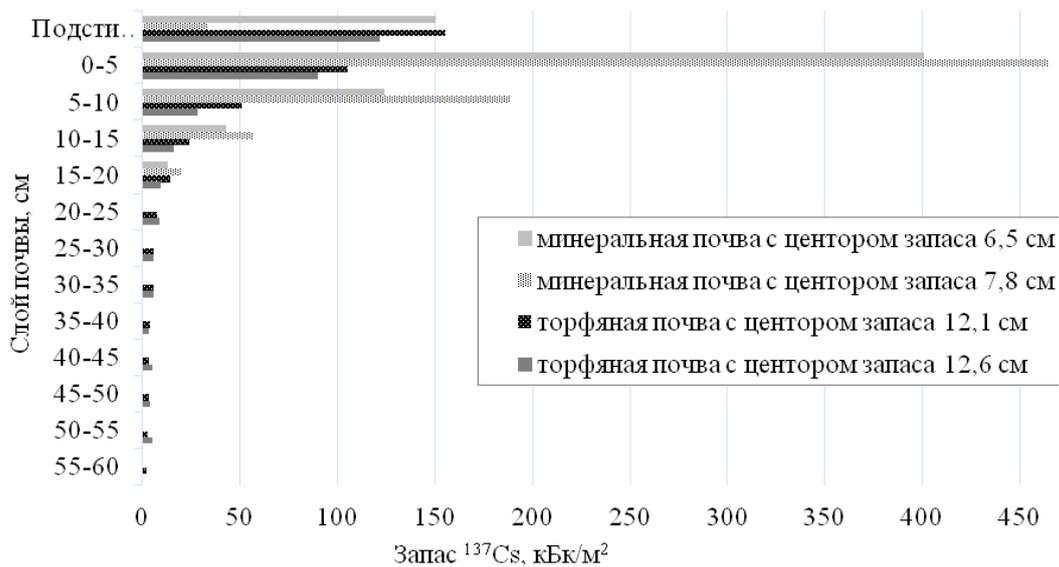


Рисунок 3 – Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в почвенном вертикальном профиле на участках с торфяной (Морозовка-3) и минеральной (Кузьмич) почвах

Необходимо отметить, что плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  на участках, представленных на рисунке 3, с торфяной почвой составляет 10,5 Ки/км<sup>2</sup> и 8,2 Ки/км<sup>2</sup>, а с минеральной почвой – 19,8 Ки/км<sup>2</sup> и 20,7 Ки/км<sup>2</sup>. Отсюда следует, что двукратное превышение плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  на минеральных почвах, по сравнению с торфяными, не оказывает влияние на проникновение радионуклида с большей долей его концентрации на всем протяжении корнеобитаемых слоев почвы, а также, судя по рисунку 1, и на уровень накопления радионуклида в древесной растительности.

Кроме этого, уровень накопления  $^{137}\text{Cs}$  в древесной растительности на торфяных почвах отличается не только из-за их высоких миграционных свойств, но и вследствие низкого содержания в них калия (0,01–0,30 %) по сравнению с минеральными почвами (1,02–2,91 %). Данное утверждение сделано в результате наших исследований по влиянию калийных удобрений, вносимых в почву в дозе 200–400 кг/га по д.в. ( $\text{K}_2\text{O}$ ), на потребление  $^{137}\text{Cs}$  фитомассой березы, при котором, например, в 50 м от канала (Морозовка-2) коэффициент перехода радионуклида в древесину снижался в 1,8 раза [3].

Варьирование накопления  $^{137}\text{Cs}$  в древесной растительности на мелиорированных торфяных почвах, очевидно, связано с режимом их увлажнения, который имеет ярко выраженные сезонные колебания уровня грунтовых вод. Проведенные наблюдения по изменению УГВ на участках с березовыми насаждениями, расположенных на разной удаленности от мелиоративного канала, в сезон вегетации (апрель–сентябрь) показали, что уровень накопления  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах надземной фитомассе деревьев березы в определенной степени был связан со снижением УГВ в летний меженьный период по сравнению с весенними значениями. Так, при сравнении коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвенного комплекса в каждый компонент фитомассы березы с наблюдаемыми изменениями УГВ (таблица 2), установлено, что уровень накопления  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах фитомассы деревьев имеет положительную сильную взаимосвязь ( $r_s = 0,77 \div 0,89$ ;  $p \leq 0,0008$ ) с уровнем спада УГВ.

Таблица 2 – Коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$  в компоненты фитомассы березы на гидроморфных почвах при снижении УГВ в меженный период

Объект	Расстояние от канала, м	Снижение УГВ, раз	Коэффициент перехода $^{137}\text{Cs}$ ( $\cdot 10^{-3}$ ) в компоненты фитомассы березы				
			древесина	кора	побеги 1-летние	побеги 2-летние	листья
Морозовка-2	25	10,2	5,12	10,40	38,50	19,73	58,90
	50	19,7	5,12	10,14	45,41	23,26	57,20
	100	55,0	5,53	15,89	56,53	24,79	63,87
Морозовка-3	25	51,0	3,27	7,13	28,28	17,31	33,66
	50	21,0	2,89	8,78	44,31	19,95	59,01
	100	2,0	0,69	4,83	11,38	4,92	12,41
Морозовка-4	25	1,6	1,51	5,22	17,89	8,03	16,36
	50	1,8	1,73	4,74	16,12	8,98	21,81
	100	1,2	0,58	1,47	5,38	2,37	4,82
Омельное	25	4,6	1,97	8,54	16,50	10,69	24,74
	50	3,7	2,76	9,15	20,29	11,32	21,83
	100	3,4	2,30	9,89	22,39	12,35	33,13
Столбун	25	2,0	1,80	4,26	13,42	7,80	16,79
	50	2,5	2,23	5,15	16,63	10,39	16,42
	75	2,5	1,55	3,85	11,68	7,54	14,52

Таким образом, использование в практике лесного хозяйства значений, характеризующих величину снижения УГВ в меженный период, позволяет установить загрязнение, например, древесины березы с вероятностью 67,5 % на гидроморфных торфяных почвах.

**Заключение.** В результате исследования установлено, что в березовых насаждениях, произрастающих на гидроморфных торфяных почвах, режим увлажнения оказывает доминирующее влияние на уровень накопления  $^{137}\text{Cs}$  в надземных компонентах их фитомассы по сравнению с плотность загрязнения радионуклидом, что резко отличает их от древостоев на автоморфных минеральных почвах. На гидроморфных торфяных почвах наиболее характерным является высокое накопление  $^{137}\text{Cs}$  компонентами фитомассы деревьев березы при УГВ в пределах 0,5–0,7 м. При снижении УГВ ниже 0,7 м уровень загрязнения надземной фитомассы березы падает в 2,5 раза и более.

### Литература

1. Радиоактивное загрязнение лесного фонда [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://bellesozaschita.by/radiacionnyj-kontrol/radioaktivnoe-zagraznenie-lesnogo-fonda/>. – Дата доступа : 27.01.2023.
2. Булко, Н. И. Динамика загрязнения растительности лесных экосистем  $^{137}\text{Cs}$  чернобыльского происхождения / Н. И. Булко [и др.] // Лесные экосистемы : современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Института леса НАН Беларуси, Гомель, 13–15 ноября 2020 г. / Институт леса НАН Беларуси ; редкол.: А. И. Ковалевич [и др.]. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2020. – С. 320–324.
3. Исследование воздействия эдафических факторов роста древесных растений, существенно влияющих на процесс накопления радионуклидов в лесных экосистемах : отчет заключительный по НИР № ГР 20015154 / Институт леса НАН Беларуси ; рук. В. А. Ипатьев. – Гомель, 2005. – 197 с.
4. Парфенов, В. И. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС) / В. И. Парфенов, Б. И. Якушев, Б. С. Мартинович [и др.]. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – С. 535–540.
5. Мамихин, С. В. Cs-137 в древесине деревьев, произрастающих на территории, загрязненной в результате аварии на ЧАЭС / С. В. Мамихин, Ф. А. Тихомиров, А. И. Щеглов // Проблемы экологического мониторинга : тез. докл. Российской научно-практической конф. – Брянск, 1991. – Ч. 2. – С. 34–36.
6. Ipatyev, V. A. About regulation of the input of radionuclides to woody plants occurring on hidromorphic soil / V. A. Ipatyev, N. V. Mitin // Dcute and Late Consequences of Nuclear Catastrophes : Hiroshima-Nagasaki and Chernobyl Belarus-Japan Symposium : abstracts by the authors, Minsk, Oct. 3–5, 1994. – Minsk, 1994. – P. 55.

7. Ипатьев, В. А. О регулировании накопления  $^{137}\text{Cs}$  лесными насаждениями на мелиорированных почвах / В. А. Ипатьев, Н. И. Булко, Н. В. Митин // Региональные проблемы изучения и использования избыточно увлажненных лесных земель : матер. совещ. – Екатеринбург, 2000. – С. 95–96.
8. Щеглов, А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах : по матер. 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС / А. И. Щеглов. – М. : Наука, 1999. – 268 с.
9. Санжарова, Н. И. Сравнительная оценка биологической доступности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах лесных экосистем разного типа / Н. И. Санжарова, С. В. Фесенко, Д. Клейн [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2002. – Т. 39, № 4. – С. 440–447.
10. Краснов, В. П. Прикладная радиоэкология леса / В. П. Краснов, А. А. Орлов, В. А. Бузун [и др.] ; под ред. В. П. Краснова. – Житомир : «Полісся», 2007. – 680 с.
11. Переволоцкий, А. Н. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в лесных биогеоценозах / А. Н. Переволоцкий. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2006. – 255 с.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 31.10.2023

## К вопросу о северной границе распространения белозубки малой (*Crocidura suaveolens*, Pallas 1811) на территории Беларуси

Л.В. СОКОЛОВ, А.А. СОКОЛОВА

Представлены данные о находках 3 экз. белозубки малой (*Crocidura suaveolens*) в окрестностях г. Витебск, добытых на территориях речного порта и ботанического сада ВГМУ в 2022–2023 г. Предполагается значительно более широкое распространение этого малоизученного вида на территории Витебской области, чем было известно ранее.

**Ключевые слова:** *Crocidura suaveolens*, распространение, ареал, Витебская область.

The data are presented on the findings of 3 species of the small white-toothed shrew (*Crocidura suaveolens*) in the vicinity of Vitebsk, extracted on the territories of the river port and the botanical garden of the VSMU in 2022–2023. It is assumed that this poorly studied species is much more widespread on the territory of the Vitebsk region than was previously known.

**Keywords:** *Crocidura suaveolens*, distribution, area, Vitebsk region.

**Введение.** Как известно, ареал белозубки малой (*Crocidura suaveolens*, Pallas 1811) в Евразии достаточно обширен, простираясь от Западной (от Испании и Франции на западе материка) и Средней Европы (к северу до Эстонии, южных районов Тверской, Московской, Нижегородской, Пермской, Челябинской областей) через Казахстан, Среднюю Азию (Узбекистан, Киргизия, Таджикистан) и практически до Тихого океана (северо-восточный Китай, Корея) [1]–[3]. В Польской республике *Cr. suaveolens* известна из многих локалитетов, но главным образом в западных и южных областях страны, и не найдена пока в приграничных с Беларусью районах [4].

В составе фауны Беларуси белозубка малая известна давно, но в XX в. по единичным находкам [5]–[8], и лишь в последние 10–15 лет XXI в. было сделано существенное количество находок в пределах Белорусского Полесья (Брестская, Гомельская области) [9]–[13]. По сведениям гомельских зоологов, является обычным видом микротериофауны окр. г. Гомель [6]. Тем не менее, как редкий, малоизученный вид, с ограниченным южными регионами страны распространением, белозубка малая внесена в Приложение Красной книги Республики Беларусь [5], [8] со статусом «недостаточно данных» (категория DD).

На данный момент лишь по единичным находкам можно предполагать о существовании популяций *Cr. suaveolens* в центральных районах страны (указывается находка 1 экз. в окр. г. Минска [7], а также находка 1 экз. в окр. д. Романовичи Могилевской обл. [13]). В связи с этим сделанные нами находки *Cr. suaveolens* в окрестностях г. Витебск в 2022–2023 г. представляются достаточно интересными и ценными для понимания и прогнозирования распространения вида и в пределах Беларуси, и в рамках общего ареала.

Цель работы – внести уточнение в данные о распространении и дополнить кадастр находок *Cr. suaveolens* на территории Республики Беларусь.

**Результаты и их обсуждение.** В осенне-летний период 2022–2023 гг. в процессе сбора материала по фауне микромаммалий окр. г. Витебск, согласно общепринятым методикам (нами использовались ловушки Геро и ловчие канавки, а также сбора погибших зверьков [14], [15]) в числе прочих видов удалось добыть 3 особи *Cr. suaveolens*.

Первый экземпляр белозубки малой попался в ловчую канавку (в качестве цилиндров использовались 5–6 л. ПЭТ-бутыли) на территории Витебского речного порта (РУП «Витебскречтранс»), 17.09.2022.

Ловчая канавка была выкопана в 1 м от уреза воды вдоль внутреннего берега дамбы (координаты: 55.1635<sup>0</sup> с.ш., 30.1023<sup>0</sup> в.д.), ограничивающей акваторию порта от р. Зап. Двина (рисунок 1). Биотоп представлен песчано-каменистой насыпью 250 м длиной, 25–60 м шириной, по-

росшей древесно-кустарниковой растительностью (проективное покрытие около 70 %) с пятнами лугового и прибрежного водно-болотного разнотравья. Основные древесные породы насыпи – это облепиха крушиновидная (*Hippóphaë rhamnóides*), образующая местами непроходимые заросли 2–2,5 м высотой, ясень обыкновенный (*Fráxinus excélsior*), ива (*Salix sp.*), единичные экземпляры березы (*Betula sp.*). Травянистая растительность представлена различными видами злаков (на суходольных, возвышенных местах), прибрежными водно-болотными видами (в месте поймки *Cr. suaveolens*) – осокой (*Carex sp.*), чистецом болотным (*Stachys palustris*), горцем перечным (*Persicária hydropíper*), сусаком зонтичным (*Butomus umbellatus*) и др. Следует отметить, что дамба порта каждый год в весеннее половодье укорачивается примерно на 30 %, уходя под воду, и вновь приобретает прежнюю длину и высоту ближе к середине мая.



Рисунок 1 – Место поймки первого экземпляра и биотоп *Cr. suaveolens* в окр. порта г. Витебска

В ходе дальнейших исследований будет ставиться задача выяснения численности (плотности популяции) вида в данном локалитете и ее динамики, а также распространения белозубок вдоль берега реки за пределами дамбы и порта. Морфометрические и краниометрические данные найденной особи белозубки малой: длина тела – 63 мм.; длина хвоста – 29 мм.; длина ступни – 10,4 мм.; длина уха – 4,9 мм.; кондилобазальная длина – 16,3 мм.; ширина черепа – 8,1 мм.; скуловая ширина – 5,2 мм.; высота нижней челюсти – 4,2 мм; масса тела – 9 г.).

Второй экземпляр *Cr. suaveolens* (рисунок 2) был обнаружен 19.10.2022 в микрорайоне Улановичи (г. Витебск), на территории ботанического сада ВГМУ (Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет) в 7 км к северо-востоку от первой находки (координаты: 55.2224<sup>0</sup> с.ш., 30.1538<sup>0</sup> в.д.). Белозубка была найдена мертвой на краю бетонной дорожки в 15 м от административного здания учреждения (рисунок 3).



Рисунок 2 – Экземпляр белозубки малой, найденный на территории ботанического сада 19.10.2022

Территория ботанического сада (основан в 1968 г.) занимает 5 га и находится среди частной дачной застройки в 1,1 км от р. Зап. Двина. В 30–40 м от зап. границы сада начинается смешанный хвойно-широколиственный лес (основные древесные породы – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), ель европейская (*Picea abies*), осина обыкновенная (*Populus tremula*), береза повислая (*Betula pendula*), дуб черешчатый (*Quercus robur*)), простирающийся практически до берега реки.



Рисунок 3 – Место находки второй особи *Cr. suaveolens* (ботанический сад ВГМУ)

Несмотря на то, что белозубка малая проявляет известную склонность к синантропизации [16], [7], [11] и найдена на краю дорожки в антропогенном ландшафте, тем не менее, не исключена возможность того, что зверек был принесен домашней кошкой (которые, как известно, ловят, но не едят землероек) из лесопарковых участков ботанического сада. Это вполне вероятно, ввиду того, что ряд других видов мелких млекопитающих (*Arvicola terrestris*, *Microtus arvalis*, *Apodemus sylvestris*, *Rattus norvegicus*) регулярно добывается данным хищником и приносится к административному зданию со всей территории ботанического сада. Индивидуальный охотничий участок кошки по нашим наблюдениям не превышает 5 га (хищник за пределами организации не замечен), и, следовательно, есть все основания предполагать, что особь *Cr. suaveolens* если, и добыта ею, то на территории ботанического сада ВГМУ.

Основные морфометрические и краниометрические данные второго (найденного в ботаническом саду) экземпляра *Cr. suaveolens* таковы: длина тела – 52 мм; длина хвоста – 28 мм; длина ступни – 11,4 мм; длина уха – 4 мм; кондилобазальная длина – 16,0 мм; ширина черепа – 8,0 мм; скуловая ширина – 5,2 мм; высота нижней челюсти – 4,1 мм; масса тела – 5 г.

Третья особь белозубки (рисунок 4) была добыта 28.06.2023 также на территории ботанического сада ВГМУ, в центральной его части (в 125 м от предыдущей находки).



Рисунок 4 – *Cr. Suaveolens*, найденная в ботаническом саду 28.06.2023

Зверек найден мертвым на дорожке вблизи группы хвойных деревьев (ель европейская (*Picea abies*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*)) среди разнотравного луга (рисунок 5). Ввиду наличия небольшой ранки на боку, землеройка, как и в первом случае предположительно добыта кошкой. Метрические характеристики данной особи: длина тела – 63 мм; длина хвоста – 32 мм; длина ступни – 11,8 мм; длина уха – 5,1 мм; кондилобазальная длина – 16,8 мм; ширина черепа – 8,1 мм; скуловая ширина – 5,7 мм; высота нижней челюсти – 4,3; масса тела – 9 г.



Рисунок 5 – Место обнаружения третьего экземпляра *Cr. suaveolens* (ботанический сад ВГМУ)

В целом, по наиболее значимым морфометрическим и краниометрическим показателям (длина тела, кондилобазальная длина, ширина черепа (промеры выполнены механическим штангенциркулем (точность измерения 0,1 мм)) найденные особи белозубок в окр. г. Витебска не отличаются от особей из южных популяций республики (по [17], [18]) и достоверно принадлежат к виду *Cr. suaveolens* (в частности по ширине и высоте моста подглазничного отверстия, форме Рm4 верхней челюсти (90-градусный угол с вырезкой)).

**Заключение.** Находка трех экземпляров белозубки малой в окрестностях г. Витебск в 2022–2023 г. (рисунок 6) позволяет расширить взгляд на географию данного вида в пределах Беларуси и значительно отодвигает границу распространения *Cr. suaveolens* на север.

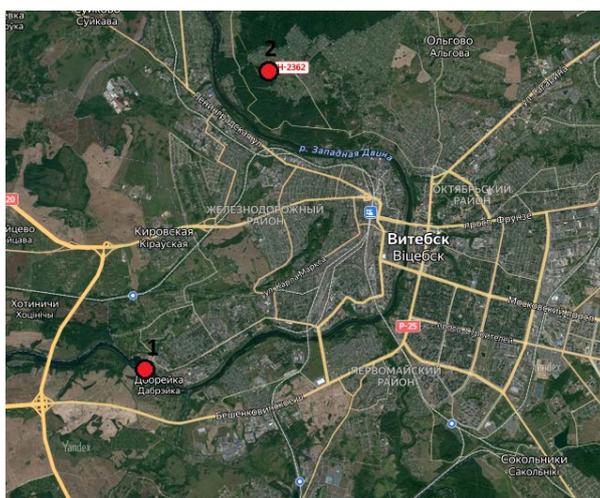


Рисунок 6 – Карта находок белозубки малой в окр. г. Витебск:

1 – речной порт РУП «Витебскречтранс»; 2 – микрорайон Улановичи, ботанический сад ВГМУ

Белозубка малая как представитель недостаточно изученных, подземно живущих видов мелких млекопитающих, возможно, достигает значительно большей численности и шире распространена, чем предполагалось ранее (что уже подтверждено, в частности, для Полесья). Недостаток информации по экологии и распространению вида также связан и с малочисленностью специалистов-териологов, отсутствием должных комплексных исследований

группы микромаммалий [9], [12] в целом по стране (за исключением природоохранных территорий). В связи с этим имеет смысл провести обширные исследования по всей территории Витебской обл. с целью уточнения распространения белозубки малой, а также и других редких и малоизученных видов сем. Soricidae.

### Литература

1. Савицкий, Б. П. Млекопитающие Беларуси / Б. П. Савицкий, С. В. Кучмель, Л. Д. Бурко. – Минск : БГУ, 2005. – 319 с.
2. Зайцев, М. В. Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Насекомоядные / М. В. Зайцев, Л. Л. Войта, Б. И. Шефтель. – СПб. : Наука, 2014. – 391 с.
3. Павлинов, И. Я. Звери России : Справочник-определитель / И. Я. Павлинов. – М. : Т-во науч. изд. КМК, 2019. – Ч. 1. – 702 с.
4. Zębiełek karliczek *Crocidura suaveolens* (Pallas, 1811) [Electronic resource] // Atlas Ssakow Polski. – Mode of access : <http://www.iop.krakow.pl/ssaki/Gatunek.aspx?spID=29>. – Date of access : 20.02.2023.
5. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь ; Национальная академия наук Беларуси ; ред.: А. А. Дубовик [и др.]. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2004. – 318 с.
6. Саварин, А. А. О статусе белозубки малой (*Crocidura suaveolens* Pallas, 1811) на юго-востоке Беларуси / А. А. Саварин // Веснік МДУ імя А.А. Куляшова. – 2008. – № 1 (29). – С. 182–186.
7. Гричик, В. В. Животный мир Беларуси. Позвоночные : учеб. пособие / В. В. Гричик, Л. Д. Бурко. – Минск, 2013. – 399 с.
8. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь ; Национальная академия наук Беларуси ; гл. редкол.: И. М. Качановский [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2015. – 317 с.
9. Саварин, А. А. К экологии и видовой диагностике белозубок (*Crocidura*, *Soricidae*), обитающих на территории Белорусского Полесья / А. А. Саварин, А. Н. Молош // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2015. – № 6 (93). – С. 29–33.
10. Саварин, А. А. Методические основы изучения мелких млекопитающих (на примере р. *Crocidura*) : для студентов специальности 1-33 01 02 «Геоэкология» / А. А. Саварин, А. Н. Молош ; М-во обр. Респ. Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Минск : Колорград, 2016. – 32 с.
11. Саварин А. А. О находке *Crocidura suaveolens* (Pallas, 1811) в погадках серой неясыти (*Strix aluco*) на юго-западе Беларуси / А. А. Саварин, Д. А. Китель // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2017. – № 6 (105). – С.172–173.
12. Саварин, А. А. Находки малоизученных видов насекомоядных (*Lipotyphla*) в Беларуси : критический анализ и проблемы диагностики / А. А. Саварин // *Novitates Theriologicae*. – 2020. – Pars 11. – С. 19–28.
13. Саварин, А. А. О находке белозубки малой (*Crocidura suaveolens*) на территории Могилевской области Беларуси / А. А. Саварин // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2020. – № 6 (123). – С. 163–164.
14. Новиков, Г. А. Полевые исследования экологии наземных позвоночных животных / Г. А. Новиков. – М. : Советская наука, 1949. – 602 с.
15. Шефтель, Б. И. Методы учета численности мелких млекопитающих / Б. И. Шефтель // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. – 2018. – Vol. 3 (3). – DOI 10.21685/2500-0578-2018-3-4.
16. Бобринский, Н. А. Определитель млекопитающих СССР / Н. А. Бобринский, Б. А. Кузнецов, А. П. Кузякин. – М. : Просвещение, 1965. – 382 с.
17. Саварин, А. А. Морфометрические и краниометрические особенности белозубки малой (*Crocidura suaveolens*) юго-востока Беларуси / А. А. Саварин // *Весці БДПУ*. – 2009. – № 2. – С. 50–54.
18. Саварин, А. А. Белозубки (*Crocidura*) Беларуси : краниологический портрет / А. А. Саварин. – Минск : Колорград, 2021. – 27 с.

## Фотозащитные, антиоксидантные и цитотоксические свойства экстрактов из двух видов полипоровых грибов

О.М. ХРАМЧЕНКОВА<sup>1</sup>, М.В. МАТВЕЕНКОВ<sup>1,2</sup>

Изучали *in vitro* фотозащитные, антиоксидантные и цитотоксические свойства этаноловых экстрактов из двух видов грибов семейства Polyporaceae: *Fomes fomentarius* и *Trametes versicolor*. Биомассу грибов экстрагировали этанолом по Сокслету; фотозащитные свойства оценивали по величинам солнцезащитного фактора (SPF), критической длины волны ( $\lambda_{\text{крит}}$ ) и соотношения УФ-А/УФ-Б; антиоксидантные свойства – методами определения содержания флавоноидов, ДФПГ-теста и окисления эмульсии  $\beta$ -каротина; цитотоксичность – при помощи МТТ-теста в отношении культуры клеток линии HaCaT. Установлено, что этаноловые экстракты из *F. fomentarius* и *T. versicolor* являются фотозащитными субстанциями с высоким содержанием флавоноидов, выраженными антиоксидантными свойствами и отсутствием цитотоксичности в отношении кератиноцитов человека.

**Ключевые слова:** *Fomes fomentarius*, *Trametes versicolor*, этаноловые экстракты, фотозащитные свойства, антиоксидантная активность, содержание флавоноидов, ДФПГ-тест, окисление эмульсии  $\beta$ -каротина, культура клеток HaCaT, МТТ-тест.

The photoprotective, antioxidant, and cytotoxic properties of ethanol extracts from two species of fungi of the Polyporaceae family, *Fomes fomentarius* and *Trametes versicolor*, were studied *in vitro*. Fungi biomass was extracted with ethanol according to Soxhlet; photoprotection properties were evaluated by sun protection factor (SPF), critical wavelength ( $\lambda_{\text{crit}}$ ), and UV-A/UV-B ratio; antioxidant properties – according to the flavonoid content, DPPH assay and  $\beta$ -carotene bleaching assay; cytotoxicity – using the MTT test against HaCaT cells. It has been shown that ethanol extracts from *F. fomentarius* and *T. versicolor* are photoprotective substances with a high content of flavonoids, pronounced antioxidant properties and no cytotoxicity against human keratinocytes.

**Keywords:** *Fomes fomentarius*, *Trametes versicolor*, ethanol extracts, photoprotective properties, antioxidant activity, flavonoid content, DPPH assay,  $\beta$ -carotene bleaching, cell culture HaCaT, MTT test.

**Введение.** Жесткие, кожистые, пробковато-деревенистые «наросты» на живых, а чаще гниющих стволах деревьев испокон веку называемые трутовиками, являются паразитарными или сапрофитными видами грибов, широко распространенных в лесах Беларуси. Термин «трутовики» не является таксономическим, так как обозначает довольно много видов грибов из разных систематических групп. Семантическая связанность этого понятия со словом «трут» (материал для разжигания огня) уходит в глубокую древность человечества и никак не связана с научными знаниями. Однако трутовики зачастую входили в фармакопеи и лекарственные препараты, используемые на протяжении тысячелетий разными народами во всем мире. В настоящее время имеет место большой научный интерес к трутовикам в связи с тем, что различные экстракты и выделенные из них соединения показали широкий спектр биологических свойств, среди которых антиоксидантная, противовоспалительная, цитотоксическая и противомикробная активность [1], [2].

В зависимости от способа экстрагирования, из трутовиков можно получить субстанции, содержащие вещества определенных химических классов: полисахариды – экстракция этанолом, горячей водой, растворами щелочей и кислот; фенольные и стероидные соединения – экстракция органическими растворителями (этанол, метанол, гексан, хлороформ, водные растворы ацетона) [3].

Целью настоящего исследования была оценка фотозащитных, антиоксидантных и цитотоксических свойств этаноловых экстрактов из трутовиков настоящего и разноцветного.

**Методы исследований.** Для исследования выбрали два вида грибов семейства полипоровые (Polyporaceae) – Трутовик настоящий (*Fomes fomentarius* (L.) Fr.) и Трутовик разноцветный (*Trametes versicolor* (L.) Lloyd) – рисунок 1 [4].



Рисунок 1 – Объекты исследования

Трутовик настоящий (*F. fomentarius*) встречается на лиственных породах деревьев, а также на сухостое, валежнике и пнях. Для данного вида грибов показана иммуномодулирующая, противомикробная, антиоксидантная, противовирусная, гипогликемическая, фибринолитическая, тромболитическая, противоопухолевая активность [5], [6]. Трутовик разноцветный (*T. versicolor*) часто встречается в лиственных лесах и почти никогда в хвойных. Обычно растет на пнях и ветвях деревьев, предпочтительно в солнечных местах [5]. Для него показана иммуномодулирующая, противовирусная и противоопухолевая активность [5], [7].

Образцы плодовых тел грибов были получены из лаборатории микологии кафедры лесохозяйственных дисциплин биологического факультета Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Навески воздушно-сухой биомассы экстрагировали этанолом по Сокслету, растворитель отгоняли, экстракты высушивали при комнатной температуре.

Для оценки фотозащитных свойств экстракты растворяли в этаноле в концентрации 200 мкг/мл, снимали спектры поглощения в диапазоне 290 ÷ 400 нм, рассчитывали величины SPF,  $\lambda_{\text{крит}}$  и УФ-А/УФ-Б [8].

При изучении антиоксидантных свойств экстракты и вещество сравнения ( $\alpha$ -токоферол) растворяли в этаноле в концентрации 1 мг/мл. Суммарное содержание флавоноидов определяли по методике с применением хлорида алюминия [9]; ДФПГ-тест и окисление эмульсии  $\beta$ -каротина – с использованием методических подходов, изложенных в [10].

МТТ-тест на культурах клеток HaCaT выполняли с использованием растворов экстрактов в ДМСО по методике, описанной в [11].

Спектрофотометрию образцов производили с помощью УФ-спектрофотометра Solar PB 2201, измерительные кюветы – кварцевые, длина оптического пути 10 мм, а также планшетного спектрофотометра TecanSafire I.

Анализ результатов исследования осуществляли с помощью программного продукта MicrosoftExcel.

**Результаты и их обсуждение.** Процентный выход этаноловых экстрактов из воздушно-сухой биомассы изучаемых макромицетов составил  $5,6 \pm 0,39$  и  $5,1 \pm 0,68$  для *F. fomentarius* и *T. versicolor*, соответственно. Полученные данные практически не с чем сравнивать, так как имеющиеся в научной литературе результаты получены методом мацерации (настаивания биомассы в растворителе) – таблица 1.

Таблица 1 – Эффективность экстракции плодовых тел макромицетов

В процентах

Виды макромицетов	Экстрагенты	Выходэкстрактов	Источник	
<i>F. fomentarius</i>	дихлорметан	0,6	[5]	
	метанол	0,7		
	петролейный эфир	4,3	[12]	
	хлороформ	0,4	[13]	
	циклогексан	4,3	[14]	
	этанол		1,7	[5]
			2,3	[13]
			4,1	[15]
			5,7	[16]
			5,5	[17]
		5,8	[14]	
	2,6	[12]		
<i>T. versicolor</i>	гексан	0,17	[18]	

По понятным причинам мы исключили из рассмотрения все данные о выходе экстрактов, где в качестве экстрагента выступала вода. Очевидно, что при экстрагировании биомассы грибов по Сокслету выходы экстрактов не хуже таковых, полученных методом мацерации.

Содержание флавоноидов в этаноловых экстрактах из *F. fomentarius* и *T. versicolor* составляло  $22,5 \pm 1,04$  и  $17,9 \pm 0,65$  мг-экв рутина на 1 г экстракта, соответственно. Эти данные можно сопоставить лишь с результатами для метаноловых экстрактов, выраженными в мг-экв катехина ( $1,2 \pm 0,01$ , *F. fomentarius*) и кверцетина ( $13,8 \pm 0,21$ , *T. versicolor* на 1 г экстракта [19], [20].

Антиоксидантные свойства этаноловых экстрактов из *F. fomentarius* и *T. versicolor* были превосходными – таблица 2.

Таблица 2 – Антиоксидантные свойства экстрактов из макромицетов,

В процентах ингибирования

Метод исследования	<i>F. fomentarius</i>	<i>T. versicolor</i>
ДФПГ-тест	$94,1 \pm 8,98$	$88,1 \pm 7,86$
Окисление эмульсии $\beta$ -каротина	$79,6 \pm 8,32$	$84,1 \pm 6,49$

Определенная нами активность  $\alpha$ -токоферола в отношении ДФПГ составила ( $91,4 \pm 1,18$ ) %; радикала  $\beta$ -каротина – ( $89,1 \pm 0,82$ ) %, что согласуется с [21] и [22]. Результаты оценки влияния этаноловых экстрактов из изучаемых видов макромицетов на окисление эмульсии  $\beta$ -каротина сравнивать не с чем, так как таких данных просто нет. ДФПГ-тест показал лучшие антирадикальные свойства наших экстрактов по сравнению с таковыми, описанными в [13], [15], [23], [24].

В современной научной литературе практически отсутствуют данные о фотозащитных свойствах экстрактов из макромицетов. Между тем, снятие спектров поглощения в диапазоне  $290 \div 400$  нм для растворов с концентрацией, при которой определяют простейшие параметры фотозащиты (SPF,  $\lambda_{\text{крит}}$  и УФ-А/УФ-Б), позволяет *in vitro* сделать вывод о перспективности упомянутых субстанций как солнцезащитных средств, особенно если такие данные подкрепляются отсутствием цитотоксичности в отношении культур клеток кожи человека (HaCaT).

Для этаноловых экстрактов мы выполнили все перечисленное – рисунок 2, таблица 3.

Все значения оптических плотностей растворов, превышающие 2,0 Б, получены путем экстраполяции после статистически надежного определения линейности зависимости оптической плотности раствора от его концентрации. Как и для экстрактов из лишайников [8], [11], следует отметить, что экстракты из плодовых тел грибов эффективнее поглощают УФ-Б ( $290 \div 320$  нм), чем УФ-А ( $320 \div 400$  нм).

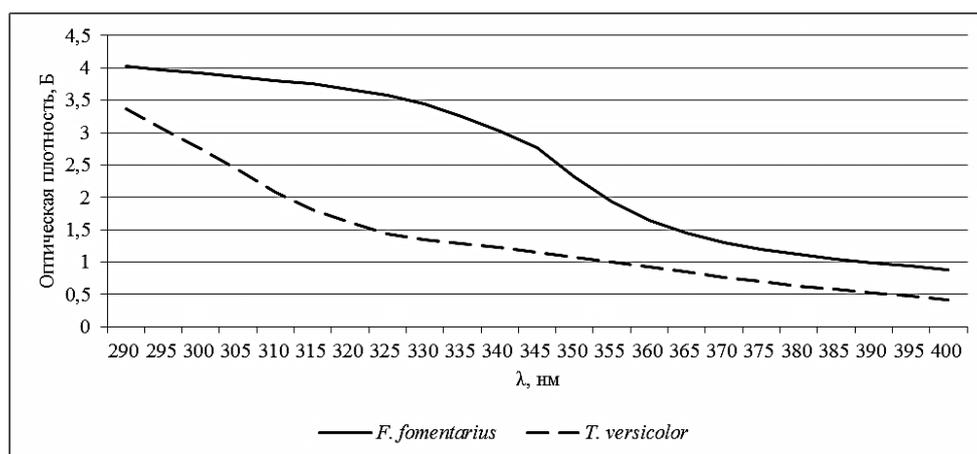


Рисунок 2 – Спектры поглощения этаноловых экстрактов из двух видов полипоровых грибов

Пологость кривых позволяет предположить наличие фотозащитных свойств у анализируемых экстрактов из макромицетов. Кроме того, оказалось, что анализируемые экстракты не оказывали достаточно выраженного и монотонного цитотоксического эффекта в отношении культуры кератиноцитов человека HaCaT. Это позволяет говорить об отсутствии зависимости цитотоксической активности экстрактов от их концентрации, и, как следствие, наличия токсического эффекта в целом.

Таблица 3 – Показатели фотозащиты и цитотоксичности этаноловых экстрактов из макромицетов

Показатель, единицы измерения	<i>F. fomentarius</i>	<i>T. versicolor</i>
SPF, абс.ед.	38,7 ± 4,47	24,5 ± 1,43
$\lambda_{\text{крит}}$ , нм	375 ± 4,1	377 ± 3,7
УФ-А/УФ-Б, абс.ед.	1,23 ± 0,11	0,82 ± 0,08
Полуингибирующая концентрация, мкг/мл	> 200	> 200

Уровень фотозащиты экстракта признается отсутствующим при SPF < 2; низким при SPF = 2–6; средним при SPF = 8–12; высоким при SPF = 15–25; очень высоким при SPF = 30–50; сверхвысоким при SPF > 50. Фотозащитные средства по величине УФ-А/УФ-Б делятся на слабые (0 ÷ 0,2); средние (0,2 ÷ 0,4); хорошие (0,4 ÷ 0,6); превосходные (0,6 ÷ 0,8) и максимальные (0,8 ≥). Субстанции, характеризующиеся  $\lambda_{\text{крит}} > 370$  нм и SPF > 15,0 признаются солнцезащитными [25], имеющие величину полуингибирующей концентрации в отношении культуры клеток ниже 30 мкг/мл – цитотоксичными [26]. Остальное – очевидно.

**Благодарности.** Авторы благодарят преподавателей и студентов кафедры лесохозяйственных дисциплин биологического факультета Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины и лично к.с/х.н., доцента В.В. Трухоновца за предоставленные ими образцы плодовых тел полипоровых макромицетов.

**Заключение.** При выполнении *in vitro* оценки фотозащитных, антиоксидантных и цитотоксических свойств этаноловых экстрактов из плодовых тел полипоровых грибов *Fomes fomentarius* и *Trametes versicolor* созданы экспериментальные образцы, являющиеся фотозащитными субстанциями с высоким содержанием флавоноидов, хорошо выраженными антиоксидантными свойствами и отсутствием цитотоксичности в отношении кератиноцитов человека.

Исследование проводилось в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма «Радиация и биологические системы», задание 10.3.03.01, № ГР 20211714.

## Литература

1. Medicinal mushrooms : bioactive compounds, use, and clinical trials / G. Venturella [et al.] // International journal of molecular sciences. – 2021. – Vol. 22 (2). – P. 634–664.
2. Medicinal mushrooms : Valuable biological resources of high exploitation potential / M. L. Gargano [et al.] // Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. – 2017. – Vol. 151 (3). – P. 548–565.
3. Valorization of Mushroom By-Products as a Source of Value-Added Compounds and Potential Applications / F. Antunes [et al.] // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – P. 26–72.
4. Mycology Collections Portal [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.mycportal.org>. – Data of access : 17.07.2023.
5. Antibacterial and cytotoxic activities of wild mushroom *Fomes fomentarius* (L.) Fr., Polyporaceae / M. Kolundžić [et al.] // Industrial Crops and Products. – 2016. – Vol. 79. – P. 110–115.
6. Antiproliferative activity and cytotoxicity of some medicinal wood-destroying mushrooms from Russia / A. V. Shnyreva [et al.] // International Journal of Medicinal Mushrooms. – 2018. – Vol. 20 (1). – P. 1–11.
7. Smolibowska, J. Medicinal properties of fungi occurring on *Betula* sp. trees. A review / J. Smolibowska, M. Szymański, A. Szymański // Herba Polonica. – 2016. – Vol. 62 (3). – P. 63–76.
8. Храмченкова, О. М. Фотозащитные свойства экстрактов из пяти видов лишайников / О. М. Храмченкова // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2018. – № 6 (111). – С. 81–86.
9. Pełal, A. Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay / A. Pełal, K. Pyrzynska // Food Analytical Methods. – 2014. – Vol. 7. – P. 1776–1782.
10. Munteanu, I. G. Analytical methods used in determining antioxidant activity : A review / I. G. Munteanu, C. Apetrei // International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – Vol. 22 (7). – P. 3380–3409.
11. Храмченкова, О. М. Фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства неполярных фракций биомассы лишайников в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT) / О. М. Храмченкова, М. В. Матвеевков // Журнал БГУ. – 2021. – № 2. – С. 29–35.
12. Wild-growing lignicolous mushroom species as sources of novel agents with antioxidative and antibacterial potentials / M. Karaman [et al.] // International journal of food sciences and nutrition. – 2014. – Vol. 65 (3). – P. 311–319.

13. Assessment of antioxidant properties of different *Fomes fomentarius* extracts / L. A. Bojin [et al.] // *Farmacia*. – 2020. – Vol. 68. – P. 322–328.
14. Kalyoncu, F. Antioxidant activity of the mycelium of 21 wild mushroom species / F. Kalyoncu, M. Oskay, H. Kayalar // *Mycology*. – 2010. – Vol. 1 (3). – P. 195–199.
15. Unleashing the biological potential of *Fomes fomentarius* via dry and wet milling / A. K. Darkal [et al.] // *Antioxidants*. – 2021. – Vol. 10 (2). – P. 303–322.
16. Выделение, характеристика и противовирусные свойства биологически активных веществ из высших грибов Западной Сибири / Н. Е. Костина [и др.] // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 3. – С. 336–336.
17. Проценко, М.А. Получение экстрактов и характеристика биологически активных соединений из *Fomes fomentarius* / М. А. Проценко // *Journal of Siberian Medical Sciences*. – 2013. – №. 4. – С. 11–17.
18. Qualitative analysis of an ethanolic extract from *Trametes versicolor* and biological screening against *Leishmania amazonensis* / V. Leliebre-Lara [et al.] // *Emirates Journal of Food and Agriculture*. – 2015. – Vol. 27 (7). – P. 592–595.
19. In vitro antioxidant activity of some extracts obtained from *Agaricus bisporus* brown, *Pleurotus ostreatus* and *Fomes fomentarius* / C. Mircea [et al.] // *Farmacia*. – 2015. – Vol. 63 (6). – P. 927–933.
20. Assessment of total phenolic, total flavonoid, metal contents and antioxidant activities of *Trametes versicolor* and *Laetiporus sulphureus* / S. Bulam [et al.] // *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*. – 2022. – Vol. 21 (5). – P. 39–47.
21. Boonsong, S. Antioxidant activities of extracts from five edible mushrooms using different extractants / S. Boonsong, W. Klaypradit, P. Wilaipun // *Agriculture and Natural Resources*. – 2016. – Vol. 50 (2). – P. 89–97.
22. Antioxidant activities and tyrosinase inhibitory effects of different extracts from *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies / N. Alam [et al.] // *Mycobiology*. – 2010. – Vol. 38 (4). – P. 295–301.
23. Chegini Nejad, Z. Hepatoprotective effect of *Fomes fomentarius* extract against carbon tetrachloride-induced acute liver injury in rat / Z. Chegini Nejad, M. Kurepaz-mahmoodabadi, A. Manayi // *Future Natural Products*. – 2021. – Vol. 7 (1). – P. 1–13.
24. Antioxidant/anti-inflammatory activities and chemical composition of extracts from the mushroom *Trametes versicolor* / M. Kamiyama [et al.] // *Int J Nutr Food Sci*. – 2013. – Vol. 2 (2). – P. 85–91.
25. Rojas, J. L. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes / J. L. Rojas1, M. Díaz-Santos, N. A. Valencia-Islas. – *UK Journal of Pharmaceutical and Biosciences*. – 2015. – Vol. 3 (4). – P. 18–26.
26. In vitro cytotoxic activity of Thai medicinal plants used traditionally to treat cancer / A. Itharat [et al.] // *Journal of ethnopharmacology*. – 2004. – Vol. 90 (1). – P. 33–38.

<sup>1</sup>Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Институт радиобиологии НАН Беларуси

Поступила в редакцию 14.08.2023

## Отработка методики и оценка эффективности контроля микозов древесных растений методом стволовых инъекций

В.Г. ЯРМОШ<sup>1</sup>, В.Б. ЗВЯГИНЦЕВ<sup>2</sup>

На основе литературных данных и проведенных в 2022–2023 гг. полевых испытаний разработана последовательность постановки стволовых инъекций для подавления комплексных грибных инфекций древесных растений. Деревья клена остролистного (*Acer platanoides* L.) одной возрастной категории были инъецированы в основании стволов препаратами Скор, КЭ с действующим веществом дифеноконазол (250 г/л) и Топсин М, КС с д. в тиофанат-метил (500 г/л). Действие препаратов оценивалось через 14 недель на примере подавления мучнистой росы листьев (возбудитель *Uncinula aceris* (DC.) Sacc.), черной пятнистости (возбудитель *Rhytisma acerinum* (Pers.) Fr.). Выявлено, что эффективность стволовых инъекций зависит от вводимого препарата, дозы действующего вещества, заболевания, степени поражения ассимиляционного аппарата, периода введения раствора. Прослежена тенденция изменчивости эффективности инъекций от вводимой концентрации препарата. При введении препарата Скор, КЭ в концентрации 50 % выявлено снижение черной пятнистости на 87,60 % и мучнистой росы на 73,39 %. При уменьшении концентрации биологическая эффективность снижается. Для препарата Топсин М, КС высокая биологическая эффективность была получена в концентрации 25 % против черной пятнистости (84,40 %) и против мучнистой росы (68,48 %). Полученные результаты показывают, что внутривидовое введение препаратов повышает устойчивость растений к болезням ассимиляционного аппарата, но в то же время снижает резистентность по отношению к листогрызущим вредителям, что показывает необходимость комплексного подхода к защите ценных деревьев.

**Ключевые слова:** стволовые инъекции, фунгициды, ассимиляционный аппарат, черная пятнистость, мучнистая роса, биологическая эффективность, дифеноконазол, тиофанат-метил.

Based on the literature data and field tests conducted in 2022–2023, a sequence of stem injections was developed to suppress complex fungal infections of woody plants. Norway maple (*Acer platanoides* L.) trees of the same age category were injected at the base of the trunks with the preparations Skor, EC with the active ingredient difenoconazole (250 g/l) and Topsin M, KS with thiophanate-methyl (500 g/l). The effect of the drugs was assessed after 14 weeks using the example of suppression of powdery mildew of leaves (pathogen *Uncinula aceris* (DC.) Sacc.), black spot (pathogen *Rhytisma acerinum* (Pers.) Fr.). It was revealed that the effectiveness of stem injections depends on the drug administered, the dose of the active substance, the disease, the degree of damage to the assimilatory apparatus, and the period of solution administration. The trend of variability in the effectiveness of injections depending on the administered concentration of the drug was traced. With the introduction of the drug Skor, EC at a concentration of 50 %, a decrease in black spot by 87,60 % and powdery mildew by 73,39 % was revealed. As the concentration decreases, the biological effectiveness decreases. For the drug Topsin M, KS, high biological effectiveness was obtained at a concentration of 25 % against black spot (84,40 %) and against powdery mildew (68,48 %). The results obtained show that intraplant administration of drugs increases plant resistance to diseases of the assimilation apparatus, but at the same time reduces resistance to leaf-eating pests, which shows the need for an integrated approach to the protection of valuable trees.

**Keywords:** stem injections, fungicides, assimilation apparatus, black spot, powdery mildew, biological effectiveness, difenoconazole, methyl thiophanate.

**Введение.** На территории Белорусского Полесья можно встретить много уникальных объектов ландшафтной архитектуры, таких как исторические парки, имеющие различный природоохранный статус. К памятникам природы республиканского и местного значения на территории Белорусского Полесья относится 21 парк [1]. Большая часть парков сконцентрирована в Брестской области, что составляет 85,7 % от общего количества, из них четыре являются памятниками природы республиканского значения (им. А.В. Суворова, «Совейки», «Поречье», «Маньковичский») и 13 – местного значения («Старые пески», «Сигневичи-2», «Атечизна», «Малые Сехновичи», «Грудополь», парк в г. Высокое, «Репихово», «Дубое», парк в г. Пружаны, «Замшаны», «Нижне-Теребежовский», «Ново-Бережновский», «Великорита»). На

территории Гомельской области изучено 4 парка, два из которых являются ботаническими памятниками природы республиканского значения («Красный берег», «парк Гомельского дворцово-паркового ансамбля») и два местного значения (парк в н.п. Липово, «Сутково») [2].

Основной ценностью исторических парков как объектов садово-паркового строительства являются старовозрастные деревья – живые свидетели минувших эпох [3].

Эти примеры демонстрируют, что происходят естественные причины, связанные со старением и деградацией паркового древостоя. Следовательно, без должного ухода и индивидуального лечения старовозрастные деревья будут быстрее переходить в категорию санитарного состояния «сильно ослабленные» и «усыхающие».

Большие старые деревья не только выполняют ключевые экологические функции, но и являются частью социальной сферы. Они придают людям эстетическую, символическую, религиозную и историческую ценность. Университет Аризоны в США запустил программу сохранения наследия и защиты деревьев в своем кампусе. В Польше одиночные большие старые деревья исключительной исторической ценности часто охраняются как «памятники природы» вне зависимости от их местонахождения. Признание ценности (экологической и социальной) больших старых деревьев в международном или глобальном масштабе, в частности политические документы, такие как конвенция о биологическом разнообразии, Европейская ландшафтная конвенция, или Лес Европейского Союза Стратегия или даже создание отдельной политики, настоятельно призывает страны признать и задокументировать различные ценности больших старых деревьев в их конкретном контексте, способствовать повышению осведомленности о ценности деревьев и угрозы с которыми они сталкиваются, а также для лучшей защиты этих организмов [4].

Согласно Закона Республики Беларусь «Об особо охраняемых природных территориях и объектах» памятники природы – это уникальные, невозвратные, ценные в экологических, научных, эстетических, историко-культурных отношениях природные объекты естественно-го либо искусственного происхождения, в отношении которых установлен особый режим охраны и использования. В зависимости от своей уникальности, научной и эстетической ценности, а также уровня органом государственного управления, принявшим решение об объявлении объектов памятниками природы, особо охраняемые объекты подразделяются по статусу на памятники природы республиканского и местного значения [5].

В Республике Беларусь действовал проект по выявлению, учету и оценке состояния редких и уникальных деревьев Беларуси. По итогам его работы была издана в 2021 г. энциклопедия «Живые памятники. Редкие и уникальные деревья и насаждения Беларуси» [6], в которой приводятся сведения об объектах растительного мира в статусе ботанических памятников природы, показана сотня наиболее интересных представителей деревьев ботанических памятников природы, являющихся национальным достоянием и гордостью страны. Содержится информация об опыте по изучению, охране и содержанию высоковозрастных деревьев Республики Беларусь [6].

Ослабленные воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды, древесные насаждения в значительной степени теряют способность противостоять заражению фитопатогенами и компенсировать вред, наносимый фитофагами [7].

Для старовозрастных деревьев наиболее перспективным являются стволовые инъекции как один из методов химической обработки [3].

Способность растений перемещать по своим органам вводимые инъекцией вещества была известна еще в средние века. Леонардо да Винчи вводил мышьяк в персиковые (яблони) деревья, чтобы сделать плоды ядовитыми [8], [9], [10]. Хейлз провел много экспериментов в начале 1700-х гг., одним из которых было введение камфоры в деревья. При цветении ощущался запах камфары [9]. Сакс в 1894 г. вводил раствор соли железа для корреляции дефицита железа. В США в 1894 г. Иван Шевырев впервые использовал инъекции для борьбы с вредителями древесных растений [8].

Скорость восходящего потока в ксилеме различается по видам деревьев и зависит от строения проводящей ткани. По закону Хагена-Пуазеля проводимость сосудов увеличивается с увеличением диаметра сосуда в четвертой степени [11]. Поэтому листовые породы с крупными сосудами перемещают впрыскиваемую жидкость с большей скоростью, чем хвойные породы (например, сосны, болиголовы) [12].

Скорость передвижения воды по дереву в течение суток меняется соответственно интенсивности транспирации [13]. В ясные дни скорость поглощения инъекционных растворов была выше, чем в дождливые дни. Большая влажность воздуха и почвы приводит к замедлению процесса транспирации и следовательно поглощение инъекционных растворов идет медленнее [9], [14].

Целью данных исследований являлась оценка фунгицидной эффективности стволовых инъекций на примере подавления развития микогенных патологий ассимиляционного аппарата древесных растений.

**Материалы и методы.** Объектами исследования являлись экземпляры клена остролистного (*Acer platanoides* L.) одной возрастной категории на территории ботанического памятника природы республиканского значения «Парк Поречье». Выбор модельных объектов обоснован повсеместным использованием данных видов в посадках исторических парков (выбран 21 экземпляр: 18 опытных и 3 контрольных). Средняя высота модельных деревьев клена составляла около 20 м, диаметры 30–38 см. На территории исследуемых объектов за вегетационный период не проводились санитарная обрезка и уборка захламленностей.

Стволовые инъекции производили в начале вегетации (23–24 мая 2023 г.), препараты вводили в основание ствола опытных деревьев на высоте около 10–15 см от земли. Окружность ствола делили на 10 секторов в каждом из которых сверлилось отверстие диаметром 8 мм, глубиной 50 мм с уклоном около 30° вниз от горизонтали. Для проведения стволовой инъекции использовали инъекционный шприц объемом 50 мл, раствор вводился под давлением руки. Схема опыта включает 6 вариантов (два испытуемых препарата в трех концентрациях) в 3-кратном повторении. В качестве фунгицида для стволовых инъекций *A. platanoides* использовали Скор, КЭ с д. в. дифеноконазол (250 г/л) и Топсин М, КС с д. в. тиофанат-метил (500 г/л). Препараты были разведены дистиллированной водой для получения рабочих растворов с концентрациями 10, 25 и 50 %. После проведения инъекций отверстия герметизировали садовым варом.

Через 100 дней (14 недель) после инъектирования на каждом дереве были собраны по пять экземпляров ветвей в нижней части кроны (высота до 5 м) с 5–8 листьями на каждой. Листовые пластинки подвергались осмотру и определению относительной площади покрытия ассимиляционного аппарата доминирующими болезнями – мучнистой росой (возбудитель *Uncinula aceris* (DC.) Sacc.), черной пятнистостью (возбудитель *Rhytisma acerinum* (Pers.) Fr.).

Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась по методикам Б.А. Доспехова (статистические характеристики количественной изменчивости) [15] с помощью пакета прикладного программного обеспечения Microsoft Excel и «Statsoft (USA) Statistica v.6.0» с расчетом выборочной средней и стандартной ошибки среднего. Использовались методы описательной статистики (получение и сравнение числовых характеристик экспериментальных данных). В приведенных расчетах применяли величину доверительной вероятности  $P$ , равную 95 %, соответствующий ей уровень значимости  $q$ , равный 5 %, и ошибку  $3S$ . Грубые ошибки исключали по критерию Стьюдента. Для расчета биологической эффективности использовалась формула Аббота (1), которая интегрирует влияние факторов, определяющих естественную гибель в контроле:

$$\text{БЭ} = \left[ \frac{K - O}{K} \right] \times 100, \quad (1)$$

где БЭ – биологическая эффективность,  $K$  – развитие (пораженность) болезни в контроле (без обработки),  $O$  – развитие (пораженность) болезни в испытываемом варианте после обработки [16].

Измерение диаметра ствола на высоте 1,3 м и в области инъекции осуществлялось с помощью мерной вилки; категории состояния растений оценивались по внешним признакам согласно шкале категорий состояния хвойных и лиственных деревьев (Постановление лесного хозяйства Республики Беларусь от 19.12.2016 № 79 «Санитарные правила в лесах Республики Беларусь»). Для идентификации возбудителей болезни и степени пораженности ассимиляционного аппарата использовали макроскопический анализ.

**Основная часть.** На основании изученной литературы и проведенных полевых испытаний (в 2022–2023 гг.) была разработана последовательность постановки стволовых инъекций:

**1. Определяется количество инъекций.** Замеряется диаметр на высоте 1,3 м. и через 12–18 см по окружности определяется количество отверстий [17].

**2. Выбор места инъекции.** Отверстие делают в основании ствола на высоте 10 см над землей или в зоне коревой лапы [18].

**3. Размер отверстия.** Для системы Arborjet используется отверстие диаметром 7 или 9 мм [11], в инъекциях при низком давлении используется трубка диаметром 9 мм [14].

**4. Подготовка инъекционного отверстия.** Перед сверлением необходимо обработать инструменты, удалить лишайники и простерилизовать кору в выбранном месте бурения [9], [17]. Не допускается проводить сверление впадин между корнями [12].

**5. Вводимый раствор.** В государственном реестре средств защиты и удобрений Республики Беларусь и государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации (2016) отсутствуют препараты, предназначенные для инъекций древесной растительности. На рынке в качестве препаратов для проведения внутривидового инъектирования предлагают как пестициды с действующими веществами из групп неоникотиноидов, авермектинов, фосфорорганических соединений, так и биологические препараты [19].

**6. Давление вводимого раствора.**

а) Mauget (компания Mauget, США) давление руки;

б) Асесар (Creative Sales, Inc., США) естественное поглощение;

с) Система низкого давления (описана Navarro et al. 1992 г.), рабочее давление составляет от 60 до 80 кПа [8], [12], [14], [20], [21].

**7. Обработка отверстия после инъекции.** После поглощения раствора отверстие герметизируют [18]. Отверстия можно закрыть силиконом Selleys 780 или небольшим количеством герметика для ран [22].

**8. Остатки инъекционных соединений.** Анализ исследований остатков соединений пестицидов показал, что определенный промежуток времени происходит заметное сокращение концентрации вводимых веществ [17], [20], [23], [24], [25], [26]. Остаток имидаклоприда в ксилемном соке уменьшился у всех деревьев в течение лета, что соответствует результатам 2003 г. [23]. При инъекциях абамектином 2 % (2–3 мл) остатки инсектицида определялись в пыльце через сутки (0,145 мг/кг), через 8 дней (0,048 мг/кг), через 16 дней (< 0,005 мг/кг) [24]. Полевые испытания стойкости текбуконазола показали, что снижение его концентрации за первые 3 дня происходит на 70 % [26].

**9. Распределение концентрации инъекций.** Эквивалентные концентрации имидаклоприда варьируется в зависимости от положения ветвей относительно точки инъекции [27].

**10. Последствия инъекций.** Если в процессе инъекции в отверстие попадает воздух, то это приводит к постепенному прекращению поглощению растворов [8], [9], [21]. Рядом с местом инъекции происходит разрастание каллюсной ткани. Инъекционные отверстия с южной сторон заживают дольше, чем с северной [28].

В полученных результатах была выявлена заметная биологическая эффективность фунгицидного воздействия препаратов, вводимых путем ствольных инъекций, на всех изучаемых видах деревьев. Лучшую биологическую эффективность комплекса болезней листьев показал Скор, КЭ в максимальной концентрации (табл. 1). Кроме снижения количества зон поражения и площади инфекционных пятен на листьях отмечена задержка в формировании стромы возбудителя – гриба *R. acerinum* по сравнению с контролем. Так, при инъектировании клена препаратам Скор, КЭ с действующим веществом дифеноконазол в концентрации 50 % выявлено снижение развития черной пятнистости на 87,60 % и мучнистой росы на 73,39 %, но при введении препарата уменьшенной концентрации (10 и 25 %) биологическая эффективность снижается. Для препарата Топсин М, КС с действующим веществом тиофанат-метил высокая биологическая эффективность была получена при концентрации 25 % против черной пятнистости 84,40 % и против мучнистой росы 68,48 %, при других концентрациях биологическая эффективность несколько ниже.

В целом по мучнистой росе биологическая эффективность препаратов оказалась ниже и составляла по модельным деревьям от 41,87 до 73,39 %, возможно, это связано с большей толерантностью *U. aceris* к применяемым д. в. Аналогичные результаты были получены в опытах по инъекциям, которые были заложены в 2022 г. в рядовом типе посадки на территории студенческого городка в Негорельском учебно-опытном лесхозе [3].

Таблица 1 – Биологическая эффективность стволовых инъекций на *Acer platanoides* L. против мучнистой росы и черной пятнистости

Номер дерева	Категория состояния	Диаметр в области инъекции, см	Диаметр на высоте 1,3 м, см	Действующее вещество (г/л)	Концентрация препарата в рабочем растворе, %	M ± m, % черной пятнистости от площади листа	M ± m, % мучнистой росы от площади листа	Биологическая эффективность, %	
								по черной пятнистости	по мучнистой росе
4, 5, 15	2–3	34,00	29,67	Дифеноконазол (250)	50	0,31 ± 0,11	2,20 ± 0,35	87,60	73,39
1, 2, 3	2	37,67	32,83	Дифеноконазол (250)	25	0,79 ± 0,24	2,96 ± 0,29	68,27	64,21
16, 17, 18	2–3	34,33	34,67	Дифеноконазол (250)	10	0,88 ± 0,20	2,81 ± 0,26	64,93	66,06
19, 20, 21	2–3	32,33	28,67	Тиофанат-метил (500)	50	3,00 ± 0,26	2,84 ± 0,31	-20,13	65,74
9, 10, 11	2–3	33,33	29,33	Тиофанат-метил (500)	25	0,39 ± 0,12	2,61 ± 0,26	84,40	68,48
12, 13, 14	2	32,00	27,67	Тиофанат-метил (500)	10	0,71 ± 0,18	4,81 ± 0,39	71,47	41,87
Контроль 6, 7, 8	2–3	–	30,00	–	–	2,50 ± 0,53	8,28 ± 0,76	–	–

Примечание: M – среднее арифметическое значение, m – стандартная ошибка средней, P < 0,95.

Выявлено, что фунгицидная эффективность препаратов сохраняется на протяжении не менее 100 дней. Это существенно более пролонгированное действие, чем при традиционном способе защиты растений путем опрыскивания.

Кроме фунгицидного эффекта нами были отмечены различия в объедании ассимиляционного аппарата *A. platanoides* листогрызущими вредителями (рисунок 1).

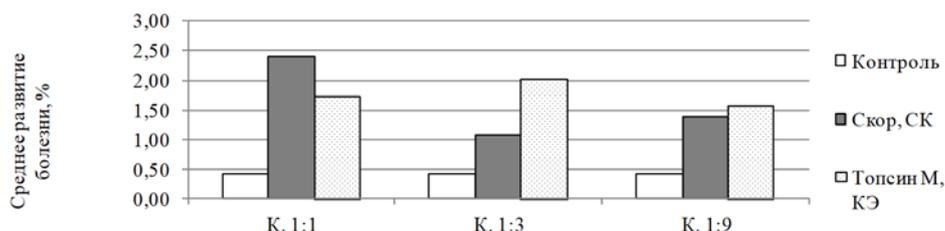


Рисунок 1 – Среднее развитие объедания листьев клена вредителями после инъектирования Скор, КЭ и Топсин М, КС

Уровень объедания вредителями листовых пластинок прямо пропорционально зависит от биологической эффективности против черной пятнистости и мучнистой росы. При инъектировании клена препаратами с действующим веществом дифеноконазол (при концентрации 50 %) уровень объедания был увеличен в 5,5 раз, при введении препарата с действующим веществом тиофанат-метил (при концентрации 25 %) произошло увеличение в 4,8 раз.

Таким образом, введение данных препаратов повышает устойчивость растений к болезням ассимиляционного аппарата, но в то же время снижает резистентность по отношению к вредителям ассимиляционного аппарата. Возможно, это связано с избирательной способностью при питании, поэтому листогрызущие насекомые отдают предпочтение более здоровым органам.

**Заключение.** На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Эффективность стволовых инъекций зависит от вводимого препарата, дозы действующего вещества, заболевания, степени поражения ассимиляционного аппарата, периода введения раствора.
2. В целом по мучнистой росе биологическая эффективность препаратов оказалась ниже и составляла по модельным деревьям от 41,87 до 73,39 %, возможно, это связано с боль-

шей толерантностью *U. aceris* к применяемым д. в., аналогичные результаты были получены в опытах 2022 г. [3], [29].

3. Внутривитальное введение препаратов повышает устойчивость растений к болезням ассимиляционного аппарата, но в то же время снижает резистентность по отношению к листогрызущим вредителям, что показывает необходимость комплексного подхода к защите ценных деревьев.

4. Для деревьев клена остролистного и липы крупнолистной с диаметром ствола на высоте 1,3 м 28–35 см. наиболее оптимальный объем введенного раствора – 50 мл.; оптимальная концентрация препарата для борьбы с мучнистой росой и черной пятнистостью с действующим веществом тиофанат-метил составила 25 % [3], [29].

## Литература

1. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://minpriroda.gov.by/ru>. – Дата доступа : 20.08.2023.

2. Блох, В. Г. Фитосанитарное состояние *Acer platanoides* L., *Tilia cordata* Mill., *Quercus robur* L. в исторических парках Белорусского Полесья / В. Г. Блох, В. Б. Звягинцев // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений : от теории к практике : материалы III Всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 11–15 апр. 2022 г. – М., 2022. – С. 24–25.

3. Блох, В. Г. Биологическая эффективность фунгицидов против болезней древесных растений при их введении методом стволовых инъекций / В. Г. Блох, В. Б. Звягинцев // Труды БГТУ. – 2023. – № 2 (270). – С. 67–75.

4. Blicharska, M. Incorporating social and cultural significance of large old trees in conservation policy / M. Blicharska, G. Mikusinski // Conservation Biology. – Sweden, 2014. – P. 1–8.

5. Павлюк, А. В. Памятники природы / А. В. Павлюк // Особо охраняемые природные территории Брестской области / Т. Ю. Борисюк [и др.]. – Брест, 1997. – Гл. 4. – С. 120–137.

6. Живые памятники : редкие и уникальные деревья и насаждения Беларуси / И. П. Вознячук [и др.] ; под ред. А. В. Пугачевского. – Минск : Бел. Энцикл. им. П. Бровки, 2021. – 360 с.

7. Дорофеева, Т. Б. Анализ состояния городских зеленых насаждений в Пушкинском районе Санкт-Петербурга / Т. Б. Дорофеева // Биосфера. – 2012. – Том 4, № 2. – С. 158–166.

8. Berger, C. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases / C. Berger, F. Laurent // Crop Protection. – 2019. – № 124 (2). – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.025>.

9. Exploring alternatives to tree injection / Thomas [et al.] ; ed. Alex L. Shigo // Journal of arboriculture. – 1991. – № 17 (8). – P. 217–224.

10. Гордовская, Е. К. Разработка С.А. Мокрежским в начале XX века метода внекорневого питания и лечения растений / Е. К. Гордовская // Научно-теоретический альманах Грані. – 2014. – Т. 17, № 11. – С. 153–160.

11. Kramer, P. J. Physiology of Woody Plants. Second edition / P. J. Kramer, S. G. Pallardy, T. T. Kozlowski. – New York : Academic Press, 1996. – 411 p.

12. Soloneski, S. Insecticides – basic and other applications [Electronic resource] / S. Soloneski, M. L. Larramendy // IntechOpen. – Access mode : <https://www.intechopen.com/books/2035>. – Date of access : 08.10.2022.

13. Чернышенко, О. В. Методы повышения устойчивости и жизнестойкости городских древесных растений / О. В. Чернышенко, Д. Е. Румянцев, Е. В. Сарапкина // Лесной вестник. – 2014. – № 5. – С. 202–206.

14. Zamora, M. A. S. Injector-size and the time of application affects uptake of tree trunk-injected solution / M. A. S. Zamora, R. F. Escobar // Scientia Horticulturae. – 2000. – № 84. – P. 164.

15. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М. : Агропромиздат, 1985. – С. 160–164.

16. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию, Институт защиты растений ; ред. С. Ф. Буга. – Несвиж : Несвижская укрупненная типография, 2007. – 508 с.

17. Burkhard, R. Environmental fate of emamectin benzoate after tree micro injection of horse chestnut trees / R. Burkhard, H. Binz, C. A. Roux [et al.] // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2015. – Vol. 34, № 2. – P. 297–302.

18. Лавров, О. П. Перспективы применения стволовых инъекций для повышения устойчивости деревьев в городской среде / О. П. Лавров, Н. А. Дубровина // Ландшафтная архитектура и формирование комфортной городской среды : материалы XIV региональной научно-практической конференции : сборник трудов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2018. – С. 134–139.

19. Несина, Э. В. Внутривидовое инъектирование – спрос и предложение / Э. В. Несина // Лесхоз. Информ.-электрон. сетевой журн. – 2018. – № 2. – С. 46–53.
20. Seasonal and cross-seasonal timing of fungicide trunk in apple trees to optimize management of apple scab / Srdan G. Aćimović [et al.] // Plant Disease. – 2016. – Vol. 100, № 8. – P. 1606–1616.
21. Navarro, C. A low-pressure, trunk-injection method for introducing chemical formulations into olive trees / C. Navarro, R. Fernandez-Escobar, M. Benlloch // J. Amer. Soc. Hort. Sci. – 1992. – Vol. 117 (2). – P. 357–360.
22. Pegg, K. G. Tree injection methodology / K. G. Pegg // Australasian Plant Pathology. – 1990. – Vol. 19 (4). – P. 142–143.
23. Evaluation of trunk injections for control of emerald ash borer / D. G. McCullough [et al.] // Proceedings of the emerald ash borer research and development meeting, 2004 October 5–6 ; Romulus, MI. FHTET 2004-15. Morgantown, WV. – U.S. : Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team, 2005. – P. 38–39.
24. Kobza, M. Tree injection in the management of horse-chestnut leaf miner. *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) / M. Kobza, G. Juhasova, K. Adamcikova, E. Onruskova // Gesunde Pflanzen. – 2011. – № 62. – P. 139–143.
25. Епихина Т.С. Оценка уровня загрязнения остаточными количествами крезоксим-метила в плодах семечковых культур методом газожидкостной хроматографии / Т. С. Епихина, Л. М. Поддымкина // Высокие технологии в растениеводстве – научная основа развития АПК : сборник статей по итогам студенческой научно-практической конференции, Москва, 21 апреля 2021 г. – М. : Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 67–70.
26. Dissipation and adsorption of isoproturon, tebuconazole, chlorpyrifos and their main transformation products under laboratory and field conditions / E. S. Papadopoulou [et al.] // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol. 569–570. – P. 86–96.
27. Spatial and temporal distribution of trunk-injected <sup>14</sup>C-imidacloprid in Fraxinus trees / S. R. Tanis [et al.] // Pest Management Science. – 2012. – Vol. 68. – P. 529–536.
28. Wasniewski, T. A. Hole angle for trunk injection of tree growth regulators and its effect on weeping, wound closure and wood discoloration / T. A. Wasniewski, W. R. Chaney, H. A. Holt // Journal of Arboriculture. – 1993. – Vol. 19 (3). – P. 131–138.
29. Блох, В. Г. О фунгицидной эффективности стволовых инъекций / В. Г. Блох, В. Б. Звягинцев // Лесное хозяйство : материалы 87-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января – 17 февраля 2023 г. – Минск, 2023. – С. 62–65.

<sup>1</sup>Полесский государственный университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный  
технологический университет

Поступила в редакцию 23.10.2023

## Method of construction of three-dimensional structures based on key corner points

N.A. AKSIONOVA, D.S. SYCH, A.V. VARUYEU

The article describes a method of construction of three-dimensional structures based on the computer vision technology that provides for automation of the process of 3D modeling of objects. A two-dimensional image is reconstructed into a relevant three-dimensional structure based on recognized key points of architectural plans. A Python-based module for pre-processing of an image and for identification of corner points of interest is developed. A method of construction of three-dimensional structures in Blender3D editor with the use of computer vision elements is presented. Module testing and approbation are demonstrated.

**Keywords:** pattern recognition, 3D-modeling, points of interest, computer vision, Blender, Python, OpenCV.

В статье описывается способ построения трехмерных структур с использованием технологии компьютерного зрения, позволяющий автоматизировать процесс 3D-моделирования объектов. На основе распознанных ключевых точек архитектурных планов двумерное изображение реконструируется в соответствующую ему трехмерную структуру. Разработан модуль предварительной обработки изображений и нахождения особых точек углов на языке программирования Python. Предложена методика построения трехмерных структур в редакторе Blender3D с использованием элементов машинного зрения. Приведено тестирование и апробация работы модуля.

**Ключевые слова:** распознавание образов, 3D-моделирование, особые точки, компьютерное зрение, Blender, Python, OpenCV.

**Introduction.** The state-of-the level of development of software and information technologies makes it possible to represent the reality around us in the format of 3D modeling. The technology of augmented reality (AR technology) provides for overlaying of digital prototypes on actual objects in real-time mode [1]. One of the most demanded areas for development of AR technology lies the field of design and architecture. The analysis of international experience in architectural visualization has shown that augmented reality systems are mostly focused on describing and displaying 3D models of buildings, structures and construction objects. At the same time, the automation of 3D modeling process is a challenge.

Architectural visualization is a modeling of a development facility in a digital (virtual) space. The existing AR-systems provide for ability to perform a panoramic flight, to add animated elements, to conduct section by section review and to get acknowledged with floor plans.

At the same time, the resource capacity of visualization of three-dimensional structures of AR-systems requires the computing system to perform technological operations in a mode close to real time. Increasing the resolution requirements of the final image and the detail of the AR system makes the calculations complex, which leads to significant delays in rendering.

For example, to obtain a high-quality image with a resolution of  $2500 \times 1400$  on a computer with CPU Intel Core i7-980 and RAM 24Gb requires a calculation time of at least 2,5 hours. Such a long interval excludes the mode of direct user interaction with the AR system. Current ways to reduce time delays: reducing the level of detail of AR-objects and using distributed rendering tools.

The procedure for analysis of the existing AR-systems was followed to assess the functional capabilities to recognize architectural plans in 3D modeling software for the subsequent modeling process.

The listed user applications are created for each project by inclusion of existing 3D models with use of such standard file formats as FBX, 3DS, OBJ. Digital 3D objects are displayed in real-time mode, but their designing and realization in 3D-modeling software takes a fair amount of time [2]. Thus, a search for methods of automation of construction of three-dimensional structures with use of computer vision elements is a relevant aspect of the main challenge of 3D modeling.

Blender is a software complex for three-dimensional modeling of open source objects. This package distinguishes itself with high flexibility and self-supportability, since it contains a comprehensive set of software tools to maintain the whole process chain of dynamic computer visualization of any complexity.

Support of Python programming language, which is interpreted by Blender, elevates Blender to the level of a full-scale modeling tool comparable in features with MathLab and similar software. This feature ensures full control of the platform tools and gives access to extensive module library created by the research community. Blender API (Application Programming Interface) Python facilitates the process of creation of additional modules extending the environment functionality.

Thus, due to the above set of features, Blender may be used as a universal software environment for objects modeling and natural research development.

The authors developed the software module «Modeling-assistance» in Python. The module is based on the function of determining the angle of development plans for further modeling of architectural projects, buildings, houses, apartments, etc. This process facilitates the construction of a three-dimensional model, ensures that initial adjustments are made in the future to a three-dimensional model that does not require changes in the design documentation itself. An author-developed variant of construction of three-dimensional structures in Blender involving use of computer vision elements is suggested in the articles. Visualization of the models developed with the use of augmented reality technology is presented.

**Description of the research methodology.** To apply the augmented reality system to architectural projects, a method of detection of characteristic features of input images is selected [3]. The concept of feature detection by computer vision refers to methods that are aimed at computing image abstractions and highlighting key features on it. Since the input information is a layout of apartments, houses, buildings, etc., isolated points representing structure corners are chosen as features. A key point is a certain area of an image, which distinguishes from the remaining parts on the given image.

To detect points of interest on an image, a computer vision algorithm needs to be realized. Algorithms of corner detection serve as the main algorithms of computer vision. The articles [4], [5] of the named study describe Python-based development of Shi-Tomasi and Harris corner detectors with the use of OpenCV, present a mathematical tool of these algorithms, demonstrate a comparative analysis and testing (approbation) of the developed software modules.

The developed «Modelling-assistance» software module is an addon for 3D-modeling software. Addons may not be started by themselves, but they are to be imported in software, therefore the module does not contain a directory with binary files. The module contains only the source code directory, the module package, and the text file with instructions on how to import the module into modeling software and how to package the module from the source, if necessary.

The OpenCV library realizes the algorithm of Shi-Tomasi corner detection, which is enclosed in «GoodFeaturesToTrack» function. The first function parameter is the image object in greyscale. This function adds some logic to the algorithm. First of all, it selects N nest corners detected on the image. The target number of corners to be detected is represented as the second function parameter. In other words, it converts an image matrix into a list of coordinates. Secondly, it applies a threshold limit for removal of the worst corners from the list. The threshold limit serves as the third function parameter. Thirdly, this function is able to remove corners located too close to each other, and this value serves as the fourth function parameter.

The method of 3D-model construction in Blender editor is demonstrated in Figure 1.

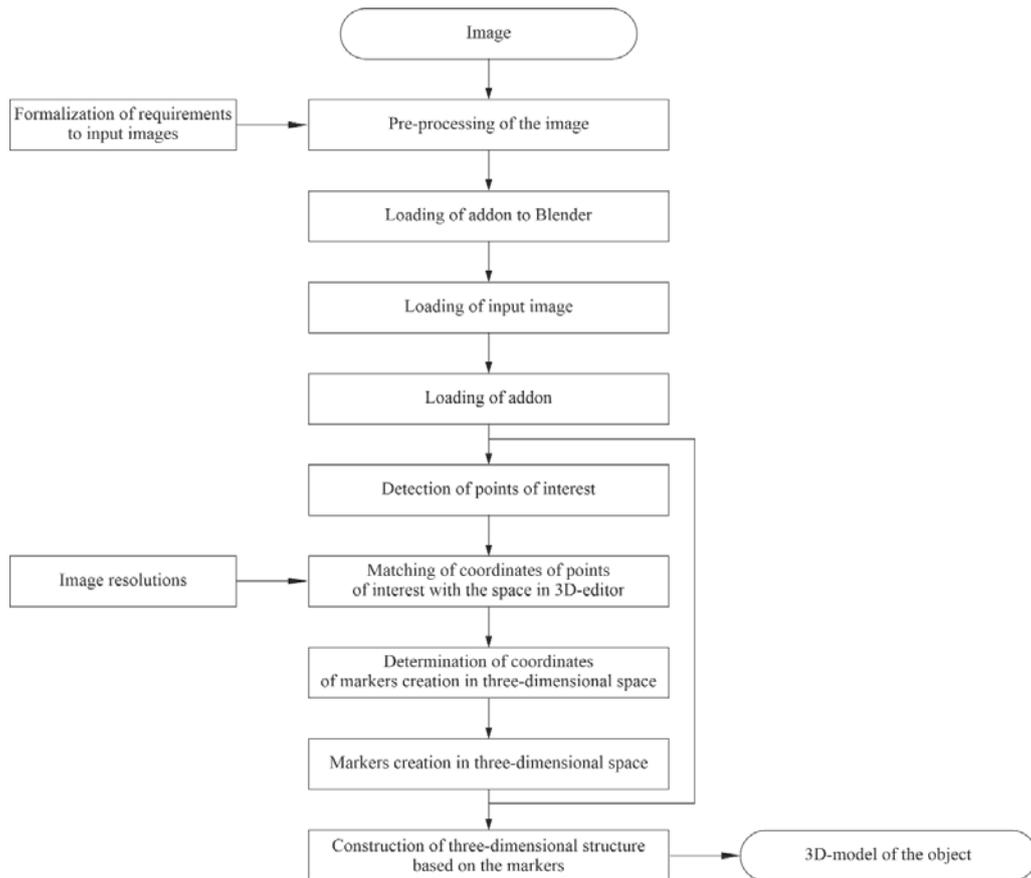


Figure 1 – Method of 3D-model construction based on key points

A digital image of a given size serves as input. The image is imported in Blender after pre-processing. To use the image, it is recommended to delete all texts, arrows and legends. Such extra data complicate the recognition process.

The recommended parameters of input image:

- high resolution with no compression artefacts;
- export to PNG format;
- conversion of color image into binary image.

«GoodFeaturesToTrack» corner detection function returns the array of coordinates of points of interest in the space of pixel coordinates of the image, where the reference point is located in the upper right corner.  $X$  and  $Y$  coordinates in Blender 3D space are specified in the metric, while the reference point is located in the upper right corner. This specific feature means that the corner coordinates shall match to the editor space.

Let  $x$  and  $y$  be the input coordinates of the image. To convert the reference points, the array of coordinates needs to be converted. For the above purpose, the size ( $S$ ) of the reference image is required. The fact that the reference image is shifted relatively to its original position by 50 % up and 50 % sideways needs to be taken into account. Thus, the reference point is automatically located in the center of the image. The conversion formula is as follows:

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{d_x} + O_x\right) \cdot S \cdot d_x}{\max(d_x, d_y)},$$

$$f(y) = \frac{\left(\frac{y}{d_y} + O_y\right) \cdot S \cdot d_y}{\max(d_x, d_y)},$$

where  $d_x$  and  $d_y$  are the sizes of the image in pixels,  $O_x$  and  $O_y$  are the values of the image shift in percent,  $S$  is the size of the reference image.

When the points from 2D and 3D spaces are matched, the values generated by the function of detection of specific corner points need to be deleted and the zero-coordinates by  $Z$  need to be matched to them. Thus, the coordinates of corner markers are received. The obtained coordinates are local. Therefore, such transformations as shifting, rotation or scaling are unavailable. This problem may be solved by adding the created object to the parent one. The sequence of «Create a 3D-model» case was presented in the article [6].

When switching to a distributed form of rendering, the load balancing between data processing nodes is planned by means of an external module. An example of such plug-in VST modules is V-Ray, Arnold, Redshift, Octane. Delays in the network environment of the cluster should be minimal and their value should be significantly less than the processing time of the visualization package for an individual node. Network storage for receiving input data for rendering and saving the results must be built using SAN or NAS technologies to meet the requirements of reliable data storage [7].

3D modeling stage shall finish with 3D model file export to OBJ format. The file itself is a text file with the list of vertexes and their coordinates, the list of faces and edges joined by these vertexes.

OBJ file format supports both approximate and accurate surface geometry coding. In case of approximate coding, the surface grid is not limited with triangular faces. Upon a user's choice, polygons like quadrangles may be used. In case of accurate coding sweet lines and surfaces, such as NURBS, are used. OBJ format provides for coding the information on color and texture. Such information is stored in a separate file with .MTL extension (material template library). It does not support any animation. The format is detected both as ASCII, and as a binary coding, but only ASCII is an open code. OBJ file format, due to its neutrality and openness, is one of the most popular exchange formats for 3D graphics. It also becomes popular in 3D printing industry, since the industry moves towards full-color printing.

**The results of implementation of the method.** Prior to using the addon module, scene settings in Blender editor need to be verified. Module running assumes that the scene contains imported reference image and that the given image is active.

Verification stages:

- 1 The object is selected.
- 2 The object is a «link» to the image.
- 3 The image is imported correctly.

The reference objects in Blender are realized as extended «blank» objects. A blank object is what happens in 3D space, but is not a 3D model. A reference to an image is one of possible blank object types. Then the image used is loaded to OpenCV library. It is converted into gray shades and corner points of interest are searched for.

The addon shall be imported in Blender 3D. To do this, the main menu is used. The settings window is opened in «Edit» menu, and then the user may use «Install» button on «Addons» tab. The file browser opens; once the script with the addon is opened, the addon is imported. Provided that there are no errors, a successful image import message is displayed and the addon is added to the list of installed addons.

By pressing the button the file browser is opened, where the file of the reference image may be found. By default the imported image is automatically oriented by the current view, but this function may be turned off in the same file browser.

When the image is imported and selected, the user may track the corners on it. If plug-in is imported correctly, «Track corners» option appears in «Object» menu. The addon code is run, when this option is selected. Corners shall appear as points on the selected image, as well as the addon setting dialog shall appear in the lower part of the screen. The configuration dialog window is rolled down by default, the user may find it and roll out by clicking the arrow icon in the corner. It is important that the reference image is selected by the moment of clicking the button, otherwise the addon is not able to detect the image and is not able to work properly.

By changing the values in the dialog window displayed, the user may specify how many corners need to be detected. In practice, the user shall increase the number of corners to be detected till all visible corners are detected. The user may also change the quality of corners detected by using the threshold value for corner detection. Another available feature is the minimum distance between the corners. By changing this parameter, the user may filter point clusters. It is recommended to specify such parameter as wall thickness in pixels.

At that moment, one of the challenges has been identified. When the configuration values are changed by drag-and-drop using input as a component of the user slider interface, the main addon function is realized for each slider step, noticeably slowing down the application. To solve the challenge, the computer vision algorithm was updated to have higher performance and lower resource consumption. The problem cause has been eliminated in the collection of the standard library of Python used for matching the values generated by the computer vision algorithm with the coordinates of 3D space in Blender. The problem was solved by introduction of NumPy library, the logics of which is realized on low-level faster programming languages.

To construct a model above the set of detected points, snapping of vertexes needs to be activated. Snapping of vertexes is a tool of Blender 3D, which is automatically transfers the transformed object to the point close to the mouse pointer. Snapping is activated by clicking on the magnet icon in the upper part of 3D view, while the vertex mode is activated in the pull down menu close to the magnet icon (Figure 2).

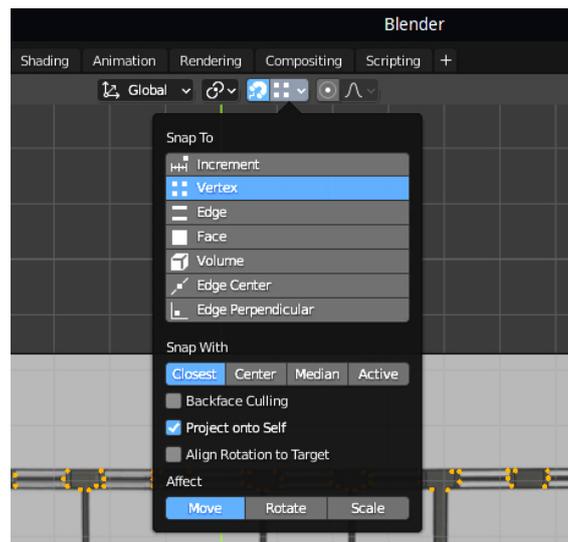


Figure 2 – Snapping of vertexes

Snapping of vertexes is used to facilitate extrusion of vertexes. Extrusion is an operation of zooming objects by their copying and snapping of relevant components to each other. The building contours are created by linking corners. To do this, a vertex corresponding to an angle is selected and is extruded to another angle. Since extrusion is a transformation, the moved corner is linked to another corner due to the activated snapping to the vertex.

The problem is that in case of snapping of points, there occurs existence of two vertexes with the same coordinates. It may cause trouble with grid coordination, model selection and export. To solve this problem, automatic vertex merging needs to be turned on. This tool automatically deletes vertex duplicates. Vertex merging is turned on in the upper right corner of 3D view in edit mode in the roll down list of parameters (Figure 3).

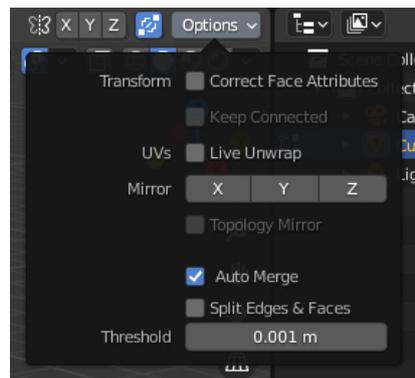


Figure 3 – Turning on Auto Merge tool to delete vertex duplicates

When all auxiliary tools are turned on, the actual modeling process may be started. Building contour is created by dragging points to their relevant neighboring points. If by any cause a vertex for some specific point is absent, the user may temporarily turn off vertex snapping by holding Ctrl.

It can be noticed that regardless that corner detection searches for all points that may be useful, there is still a probability that some points are not detected. It is possible in cases when certain design elements contain round objects. But the advantage of the approach is that it does not limit users, since the user still may add own models, such as rounds, to the grid. If the user follows all the instructions correctly, his actions result in building contour (Figure 4).

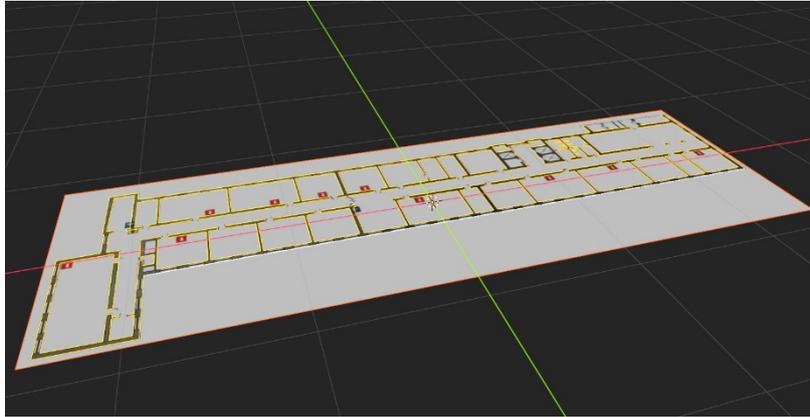


Figure 4 – Resulting building sketch

The next step is to use automatic triangulation to fill in the contour with faces. The filled in contour may be extruded up to giving the wall volume. The user presumably extends the wall till the height of the doors of the building.

At each level of the extended contour the user may alter it by, for example, linking void spaces above the doors. The user shall control the generated face orientation, since the automatic face orientation is not always correct.

Surface normal is a vector in space, which is perpendicular to the face and which indicates its direction providing for «internal» and «external» surfaces. By default, Unity does not display internal faces, therefore correct model display requires all surface normals be outwards.

It also shall be noted that doors, windows and stairs shall not be mandatory created during the process. Since the result of the process is a simple grid, the user may change it with standard tools. For example, the user may use Array modifier to create the array of cubes with the dimensions of one building window, or Boolean modifier to disjoint one volume from another.

Upon all these operations a model is ready for export (Figure 5). The next step is exporting the model from Blender 3D. This is done using file menu. Such formats as OBJ and FBX are available.

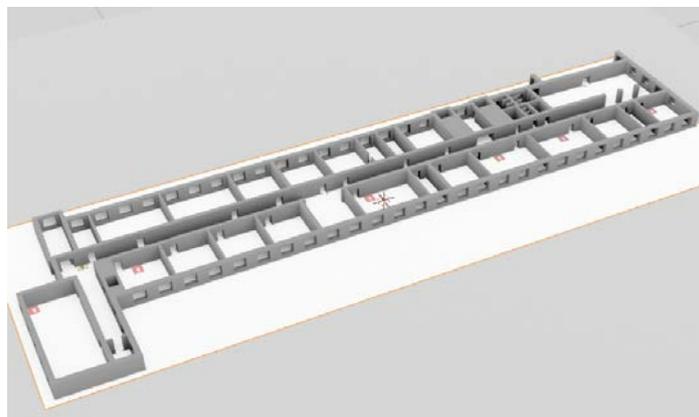


Figure 5 – Resulting 3D model

**Conclusion.** Development of object modeling methods in the environment of open software platform of Blender demonstrated its competence as a tool suitable for solution of three-dimensional spaces modeling challenges with use of computer vision elements. By means of Python-based software module, with the use of Blender API, a number of typical goals of automated search for key points on images of architectural plans were achieved and 3D models of augmented reality objects were constructed.

### References

1. Aksionova, N. A. Development of SDK for a mobile application using augmented reality technology / N. A. Aksionova, A. I. Kucharav // *Bulletin of F. Skorina Gomel State University*. – 2021. – Vol. 126 (3). – P. 81–84.
2. Aksionova, N. A. Presentation and implementation of educational material using augmented reality technology / N. A. Aksionova, A. V. Varuyeu, A. I. Kucharav // *Trends and prospects for the development of science and education in the context of globalization : electronic collection of materials of the International scient. conf.* – 2021. – Vol. 71. – P. 235–239.
3. Varuyeu, A. V. Information capacity of objects in conjunction with augmented reality / A. V. Varuyeu // *Bulletin of F. Skorina Gomel State University*. – 2021. – Vol. 126 (3). – P. 92–95.
4. Demidenko, O. M. Development of a machine vision system for image recognition of design estimates / O. M. Demidenko, N. A. Aksionova // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2022. – Vol. 25 (2). – P. 159–167. – DOI : 10.33581/1561-4085-2022-25-2-159-167.
5. Demidenko, O. M. 3D-modeling of augmented reality objects using Shi-Tomasi corner detection algorithms / O. M. Demidenko, N. A. Aksionova, A. V. Varuyeu, A. I. Kucharav // *J. Phys.* – 2021. – Vol. 2091 (012058). – DOI : 10.1088/1742-6596/2091/1/012058.
6. Aksionova, N. A. Construction of three-dimensional structures based on the recognition of key points / N. A. Aksionova, A. V. Varuyeu, O. M. Demidenko // *Information systems and technologies : materials of the international scientific congress on informatics*. – Minsk : BGU, 2022. – Vol. 3 (2). – P. 99–105.
7. Demidenko, O. M. Techniques of adapting a calculating process to operating load of a local area network / O. M. Demidenko // *International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Astrakhan, 03–07 October 2022. – Astrakhan, 2022. – P. 1–6. – DOI : 10.1109/ICCT56057.2022.9976851.

## Имитационное моделирование процесса распространения вирусной инфекции

Е.И. СУКАЧ<sup>1</sup>, А.П. КОНЧИЦ<sup>2</sup>, Н.С. ЛУКАШЕВИЧ<sup>1</sup>

Рассматривается процесс распространения вирусной инфекции в биологической популяции при заданных параметрах вирулентности вируса и коммуникативности составляющих популяции с использованием метода имитационного моделирования, позволяющего рассмотреть процесс в динамике на высоком уровне детализации.

**Ключевые слова:** модели биологических процессов, имитационное моделирование, системная динамика, агентное моделирование, вирулентность вируса, латентный период.

The process of viral infection spread in the biological population is considered at the given virus virulence and communication parameters using the simulation method, which allows to consider the process in dynamics at a high level of detail.

**Keywords:** models of biological processes, simulation modeling, system dynamics, agent modeling, virulence of the virus, latent period.

**Введение.** В ходе исследования сложных систем из различных предметных областей довольно часто используется метод имитационного моделирования [1]. При решении конкретных задач инженеру-практику обычно требуется выбрать программную среду, реализующую алгоритм имитационного моделирования, и грамотно использовать её при поиске решения. Искусством построения моделей можно овладеть только в результате многочисленной практики [2]. Поэтому актуальным является исследование возможностей различных видов моделирования, выявление их особенностей и недостатков при изучении сложных систем на различных уровнях детализации. В статье излагается опыт построения имитационных моделей распространения вирусной инфекции в закрытой популяции.

Для реализации имитационной модели использовалась многоподходная системная динамика и система моделирования AnyLogic [3]. Системная динамика как подход позволяет получить общее представление об исследуемом объекте за счет абстрагирования. В отличие от данного подхода, который, в свою очередь, является наиболее абстрактным по отношению к остальным, главное достоинство агентного моделирования заключается в акцентировании внимания на индивидуальных участниках системы. В данном типе моделирования сначала создаются агенты. Для этого указываются параметры активных объектов, и задается сценарий их действий. После этого определяются связи, которые характеризуют поведение агентов друг относительно друга. Таким образом, создается окружающая среда и запускается само моделирование. Наконец, можно использовать и многоподходное имитационное моделирование. У этого метода и вовсе нет недостатков по сравнению с остальными. Как следует из названия, его суть заключается в комбинации лучших сторон каждого из методов, а также компенсации их слабых сторон. Именно поэтому для моделирования такого сложного и неоднозначного процесса как распространение вирусной инфекции наиболее подходящим является метод многоподходного моделирования.

Основой разработки программного обеспечения, описанного в статье, была выбрана модель распространения вирусной инфекции SEIRD, которая, в свою очередь, была построена на стандартной модели SIR. Последняя построена на базе математической модели, описывающей системную динамику явления, возникающего при внедрении одного инфицированного человека в полностью восприимчивую популяцию [4]. В математической эпидемиологии она известна как модель Кермака-Маккендрика или базовая математическая модель. Несмотря на свою простоту и прозрачность работы с базовой моделью SIR, очевидным является тот факт, что существуют более точные модели, которые на детальном уровне описывают происходящие процессы и повышают точность результатов моделирования. Модель SEIRD, также как и SIR, симулирует распространение вирусной инфекции в закрытой популяции.

Основным отличием является то, что данная модель также учитывает наличие индивидуумов, находящихся в латентном периоде болезни, а также количество людей погибших от вируса. Информация, получаемая из этой модели, крайне важна, поскольку определить количество латентных переносчиков вируса в условиях реального мира практически невозможно, поскольку особи в латентном или инкубационном периоде болезни не показывают никаких симптомов, а, следовательно, являются угрозой не только для себя, но и для остальных.

Наконец, имеется возможность создать оптимизационную модель, которая максимально повышает точность прогнозирования распространения вирусной инфекции.

В статье дается формальное описание модели SEIRD, приводится вариант её реализации в системе AnyLogic и анализируются полученные результаты, демонстрирующие её эффективность и предсказательные возможности.

**Формализация объекта исследования.** Согласно модели SEIRD исследуемая популяция делится на 5 групп (в зависимости от своего отношения к болезни): восприимчивые (Susceptible), латентные (Exposed), инфицированные (Infected), выздоровевшие (Recovered), погибшие (Dead). Эта модель отличается от подобных тем, что позволяет учитывать, а следовательно, и анализировать возможность передачи вируса от латентного переносчика к восприимчивому.

Чтобы определить число зараженных на заданном временном интервале, надо иметь три вероятности, а именно: вероятность контакта между двумя индивидами ( $\alpha$ ), вероятность заражения при контакте латентного с восприимчивым ( $\beta_1$ ) и вероятность заражения при контакте инфицированного с восприимчивым ( $\beta_2$ ).

Иногда в модели вместо  $\alpha$  применяют  $1/n$ , где  $n$  – общее количество объектов популяции. Это означает, что для любого выбранного дискретного промежутка времени каждая особь вступает в контакт с одной случайной особью в популяции. Однако в нашем исследовании эта вероятность варьируется в заданных пределах. В то же время  $\beta_1$  обозначает биологический коэффициент вирулентности данного возбудителя в латентной стадии заболевания, а  $\beta_2$  обозначает биологический коэффициент вирулентности данного возбудителя в открытой стадии. Отсюда и вытекает следующая формула

$$V = \alpha * (S * E * \beta_1 + S * I * \beta_2) - C, \quad (1)$$

предназначенная для расчета скорости распространения ( $V$ ) вирусной инфекции с учетом латентных переносчиков, где  $S$  – восприимчивые,  $I$  – инфицированные,  $E$  – латентные,  $C$  – пополнение популяции.

Задав время перехода болезни из латентной стадии в открытую ( $\delta$ ), получаем формулу, предназначенную для расчета скорости перехода инфекции в открытую стадию:

$$V = E / \delta. \quad (2)$$

Инфицированные ( $I$ ) излечиваются с заданной вероятностью ( $\gamma$ ), которую в некоторых случаях рассматривают в качестве функции обратной длительности заболевания ( $T$ ). Под этим подразумевается, что в случае, когда заболевание протекает неделю, инфицированная особь в некоторый день может излечиться с вероятностью  $\gamma = 1/7$ . Таким образом, формула, предназначенная для расчета скорости выздоровления объектов в популяции, принимает вид

$$V = I / T. \quad (3)$$

Инфицированные ( $I$ ) умирают с заданной вероятностью ( $\theta$ ), которая в данном случае рассматривается как статическая переменная. Таким образом, формула, предназначенная для расчета скорости выздоровления объектов в популяции, принимает вид:

$$V = \theta / I. \quad (4)$$

Стоит отметить, что данная модель не является всеобъемлющей, так как в ней не учитывается множество различных факторов, таких как рождение, иммунитет, большое число различных событий, таких как введение карантина или создание и применение вакцины. Также предполагается, что имеет место гомогенное смешение, поскольку каждый объект исследуемой популяции имеет одинаковые шансы взаимодействовать с любым другим объектом из этой же популяции. Что касается вируса, модель предполагает отсутствие латентных периодов или периодов покоя, а также отсутствие вероятности вирусной мутации. Распространение инфекционного заболевания происходит через контакт восприимчивых с инфицированными, а выздоровевшие перестают распространять болезнь.

Как и в модели SIR, модель SEIRD также сводится к решению задачи Коши, но на этот раз не для трех а для пяти дифференциальных уравнений первого порядка с неизвестными  $S(t)$ ,  $E(t)$ ,  $I(t)$ ,  $R(t)$ ,  $D(t)$  и начальными условиями:  $S(0) = \text{TotalPopulation}$ ,  $E(0) = \text{InitialSick1}$ ,  $I(0) = \text{InitialSick2}$ ,  $R(0)=0$ ,  $D(0)=0$ . Решения данных уравнений использовались при разработке модели.

**Имитационная модель распространения вирусной инфекции.** Структурная схема модели SEIRD, построенная в системе AnyLogic, представлена на рисунке 1. На вход поступают следующие переменные:  $n$  – начальная численность популяции (статическая переменная, задаваемая пользователем, изначально имеет значение 1000);  $\alpha$  – переменная, показывающая количество объектов, с которыми контактирует зараженный индивид;  $\beta_1$  – вероятность заражения здоровой особи при её контакте с латентной зараженной;  $\beta_2$  – вероятность заражения здоровой особи при её контакте с зараженной в открытой стадии;  $\delta$  – продолжительность латентного периода болезни;  $\gamma$  – продолжительность болезни после заражения;  $\theta$  – вероятность летального исхода у здоровой особи;  $\text{InitialSick1}$  – количество латентных зараженных особей, попадающих в популяцию из здоровых людей.  $\text{InitialSick2}$  – количество открытых зараженных особей, попадающих в популяцию из здоровых особей.  $\text{SusceptibleChange}$  – численность пополнения популяции, статическая переменная, задаваемая пользователем.

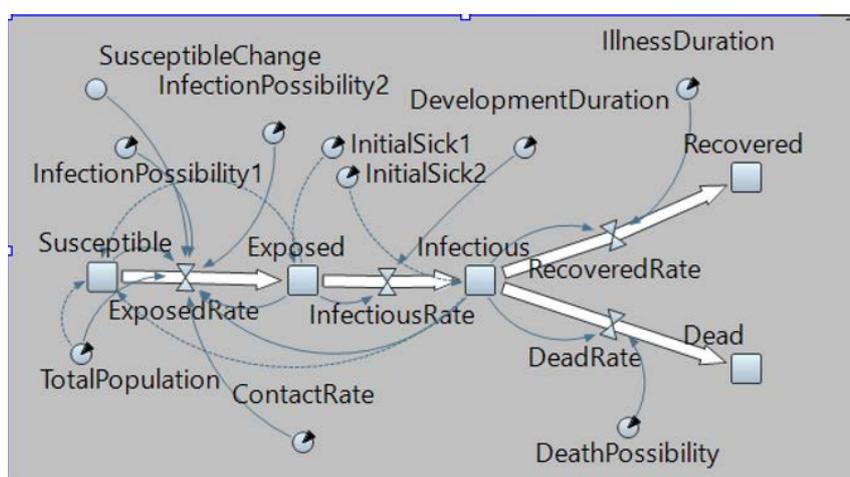


Рисунок 1 – Структура модели SEIRD распространения вирусной инфекции

В ходе реализации модели были использованы накопители.  $E$  – зараженные особи, находящиеся в латентной стадии заболевания. Начальное значение накопителя задается через  $\text{InitialSick1}$ .  $I$  – зараженные особи, находящиеся в открытой стадии заболевания. Начальное значение накопителя задается через  $\text{InitialSick2}$ .  $S$  – здоровые особи, восприимчивые к заражению. Начальное значение накопителя задается как  $n - \text{InitialSick1} - E$ .  $R$  – особи, переболевшие вирусом (выздоровевшие).

В реализованной модели не известно, насколько иммунитет особи исследуемой популяции способен его защищать, и поэтому сделано допущение о том, что выздоровевший объект популяции более не восприимчив к вирусу.

$D$  – особи, не справившиеся с вирусом (умершие), которые больше не принимают участия в моделировании.

Для организации имитационных экспериментов использовались следующие потоки:  $\text{ExposedRate}$  – поток, выходящий из накопителя  $S$  и входящий в накопитель  $E$  (рассчитывался по формуле 1);  $\text{InfectiousRate}$  – поток, выходящий из накопителя  $E$  и входящий в накопитель  $I$  (рассчитывался по формуле 2);  $\text{RecoveredRate}$  – поток, выходящий из накопителя  $I$  и входящий в накопитель  $R$  (рассчитывался по формуле 3);  $\text{DeadRate}$  – поток, выходящий из накопителя  $I$  и входящий в накопитель  $D$  (рассчитывался по формуле 4).

**Имитационное моделирование распространения вируса COVID-19.** Построенная модель SEIRD была использована для моделирования процесса распространения вирусной инфекции COVID-19. При проведении имитационных экспериментов (рисунок 2) были выбраны среднестатистические параметры, полученные с использованием данных, доступных в сети [5].

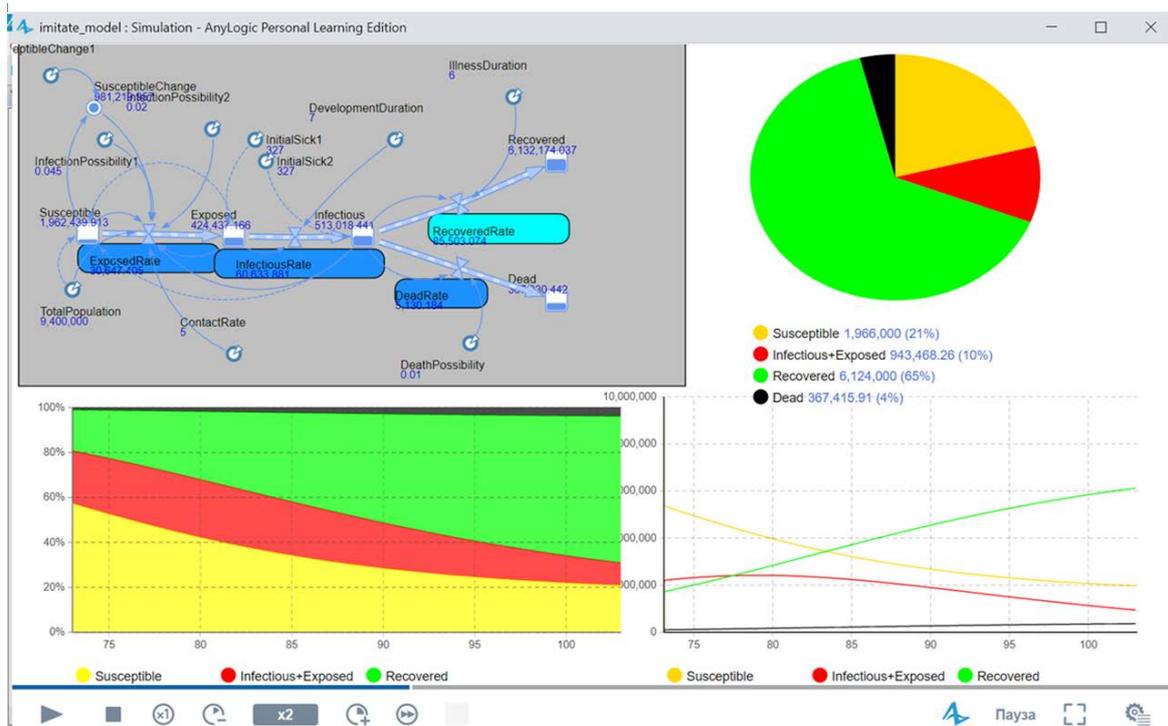


Рисунок 2 – Проведение имитационных экспериментов с моделью SEIRD

Для исследования распространения вируса COVID-19 был выбран временной промежуток, в течении которого развивалась вирусная инфекция,  $t = 300$  дней. Были заданы следующие параметры:  $\delta = 6$ ,  $\gamma = 7$ ,  $\text{InitialSick1} = 327$ ,  $\text{InitialSick2} = 289$ ,  $n = 9,4 \cdot 10^6$ ,  $\beta_1 = 0,2$ ,  $\beta_2 = 0,1$ ,  $\alpha = 6$ ,  $\theta = 0,1$ .

После моделирования сразу становится ясным тот факт, что параметры были выбраны не совсем удачно (рисунок 3а), поскольку модель показала большой процент умерших людей.

Далее был проведен калибровочный эксперимент с использованием встроенных средств AnyLogic. Для него были определены критерии оптимизации, настроены изменяемые параметры и применены методы оптимизации.

С учетом подобранных параметров под данные наблюдения были сформированы следующие параметры моделирования:  $\delta = 3$ ;  $\gamma = 6$ ;  $\text{InitialSick1} = 327$ ,  $\text{InitialSick2} = 289$ ,  $n = 9,4 \cdot 10^6$ ,  $\beta_1 = 0,045$ ,  $\beta_2 = 0,02$ ,  $\alpha = 5$ ,  $\theta = 0,01$ .

Модель показала, что за 120 дней переболело и получило иммунитет 72 % населения, не болело 15 %, болело 6 % в латентной стадии и 7 % в активной стадии. На 300 день модель показала, что восприимчивых людей стало 26 %, людей с иммунитетом – 62 %, в латентной стадии – 6 % и в активной стадии – 5 % (рисунок 3б).

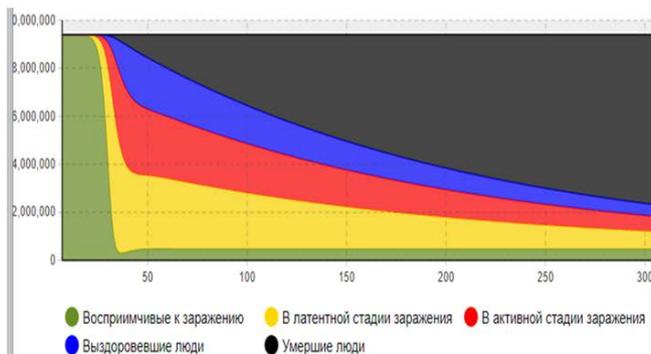


Рисунок 3а – Результаты моделирования, полученные с начальными исходными данными

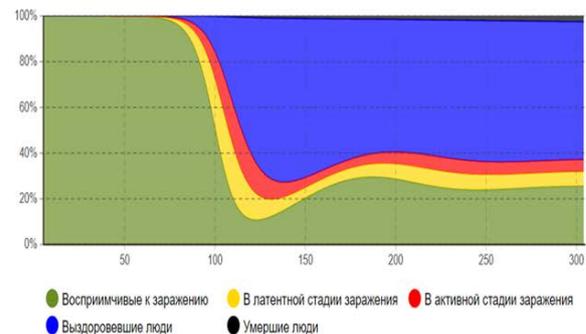


Рисунок 3б – Результаты моделирования, полученные в результате оптимизации модели

В целом, прогноз с этими данными очень близок к правде, однако в долгосрочной перспективе и он не справится с успешным прогнозом.

**Заключение.** Модель SEIRD может служить основой для математического моделирования большого числа эпидемий и пандемий инфекционных заболеваний. Имитационные эксперименты с построенной моделью позволят решить типовые задачи моделирования, а именно: построить прогнозы распространения вирусной инфекции для заданных параметров вирулентности вируса и коммуникативности составляющих популяции; определить параметры модели, при которых распространение вирусной инфекции снижается; провести сравнительный анализ (по выбранному критерию) вариантов распространения вирусной инфекции при различных мерах, снижающих передачу вирусной инфекции.

### Литература

1. Сукач, Е. И. Имитационное моделирование продолжительности жизни биологических систем / Е. И. Сукач, В. Л. Мережа, Т. Я. Каморникова // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2003. – № 3 (18). – С. 96–100.
2. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М. : Мир, 1978. – 420 с.
3. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
4. Новиков, А. Р. Применение имитационного моделирования для исследования распространения вирусной инфекции / А. Р. Новиков // Творчество молодых 2022 : сборник научных работ студентов, магистрантов и аспирантов : в 3 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; Р. В. Бородич (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2022. – Ч. 1. – С. 254–257.
5. Сукач, Е. И. Автоматизация извлечения и обработки больших данных с удаленного сервера // Д. В. Антоненко, Е. И. Сукач // НИРС 2021 : сборник научных работ студентов Республики Беларусь. – Минск : Изд. центр БГУ, 2022. – С. 12.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Институт леса НАН Беларуси

Поступила в редакцию 17.09.2023

## Анализ системного дизайна и архитектуры современных приложений

Ю.А. ТАРАСОВА

Системная часть является основой успешного и эффективного использования программного обеспечения. При этом важно отметить относительную новизну такого понятия, как системный дизайн. В связи с этим актуализируются задачи, связанные с созданием наиболее оптимального системного дизайна и архитектур современных приложений. Цель представленной статьи заключается в анализе наиболее эффективных инструментов разработки системной части программного обеспечения. Научная ценность работы состоит в предпринимаемой попытке систематизации знаний относительно представленных вопросов. Материалы статьи могут стать полезны для современных разработчиков, предоставляя комплексную информацию, которая поможет при выборе инструментов и способов реализации системного дизайна и архитектуры программного обеспечения.

**Ключевые слова:** системный дизайн, архитектура приложения, программное обеспечение, разработка приложений.

The system part is the basis for successful and efficient use of software. At the same time, it is important to note the relative novelty of such a concept as system design. In this regard, the tasks related to the creation of the most optimal system design and architectures of modern applications are being update. The purpose of the presented article is to analyze the most effective tools for developing the system part of the software. The scientific value of the work consists in an attempt to systematize the knowledge about the issues presented. The materials of the article can be useful for modern developers, providing comprehensive information that will help in choosing tools and ways to implement system design and software architecture.

**Keywords:** system design, application architecture, software, application development.

**Введение.** Системный дизайн представляет собой процесс определения архитектуры, интерфейсов и данных для системы, которая должна удовлетворять определенным требованиям. Именно системный дизайн включает в себя задачи, связанные с обдумыванием инфраструктуры, данных и способов их хранения. Проектирование информационной системы с использованием данных аспектов позволяет определить наиболее эффективную и удовлетворяющую всем бизнес-требованиям платформу [1].

Важно отметить, что системный дизайн – это комплексное понятие. При разработке программного обеспечения с целью получения наиболее оптимального и эффективного итогового решения важно и необходимо использование принципов системного дизайна. Системный дизайн при разработке современных приложений подразумевает решение нескольких последовательных задач, направленных на поиск и формирования наиболее оптимальных решений конечного продукта.

Вместе с этим стоит подчеркнуть, что это относительно новое понятие и его интерпретация в различных источниках может быть разной. Автором в рамках текущей работы преследуется цель, связанная с комплексным анализом данного вопроса и формированием методологического аппарата, отражающего анализ системного дизайна и архитектуры современного программного обеспечения.

**Результаты и обсуждение.** Проектирование системы представляет собой фазу, которая устраняет разрыв между проблемной областью и существующей системой управляемым образом. На этом этапе основное внимание уделяется области решения, то есть, вопросу: «как реализовать?». Это фаза, когда документ SRS (software requirements specification – набор требований к программному обеспечению) преобразуется в формат, который может быть реализован, и решает, как будет работать система. На этом этапе сложная деятельность по разработке системы делится на несколько мелких подвидов деятельности, которые координируются друг с другом для достижения основной цели разработки системы [2].

Системный дизайн подразумевает необходимость для всех участников процесса работы над программным обеспечением прийти к единому пониманию перед началом процесса разра-

ботки. Одним из наиболее распространенных результатов работы над системным дизайном является диаграмма, описывающая ключевые части конечного продукта и их взаимодействие друг с другом. Так, хороший результат над системным дизайном должен выявить такие аспекты, как:

- составные части (отвечает на вопрос «какие основные элементы и объекты есть в системе?»);
- взаимосвязи (отвечает на вопросы: «как соединены элементы?»; «какие существуют взаимосвязи?»; «где располагаются входы и выходы?»);
- цель конечного продукта (отвечает на вопрос «что нужно достичь?») [3].

Работа над данными задачами должна производиться в командном режиме с использованием специализированного программного обеспечения. При этом до недавнего времени наибольшей популярностью пользовалась обычная магнитная доска. Однако в результате последующей разработки инструментов выбор перешел в сторону специальных программ, позволяющих автоматизировать взаимодействие между всеми участниками процесса разработки. Примером одного из таких и наиболее популярным инструментом является Miro. Конечным результатом является четкая диаграмма, иллюстрирующая объекты и отношения между ними. На рисунке 1 представлен пример итога разработки системного дизайна посредством Miro [4].

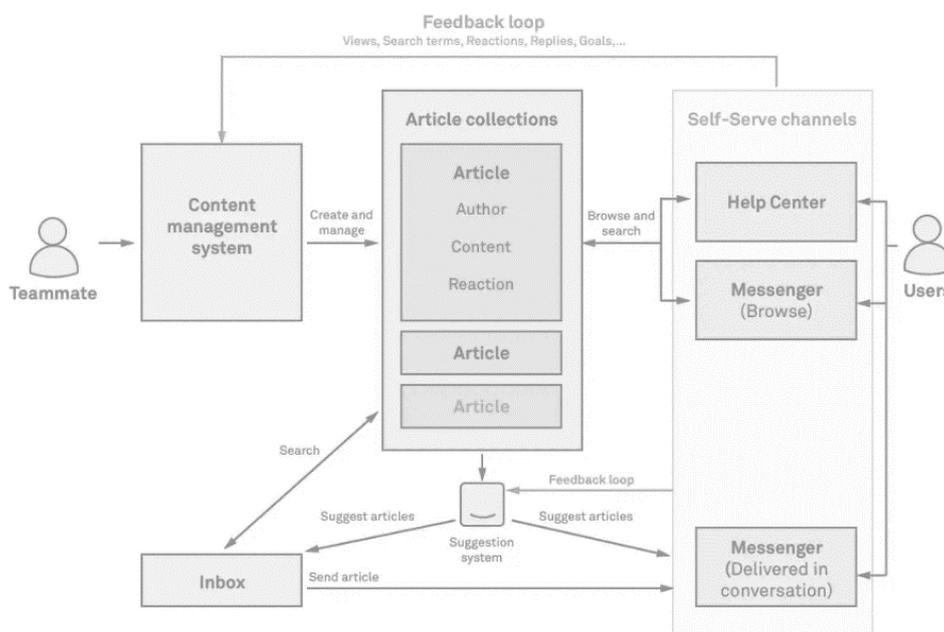


Рисунок 1 – Пример работы над системным дизайном в Miro

Главной особенностью использования цифровых инструментов создания системного дизайна является возможность перенастройки и изменения. Зачастую не только на стадии проектирования, но при разработке возникают задачи, подразумевающие расширение функционала программы и ее возможностей. Благодаря использованию специализированных инструментов, как Miro, разработчики получают возможность быстрого внесения изменений в исходный проект программного обеспечения.

Также важно отметить, что системный дизайн при разработке приложений играет ключевую роль в обеспечении их эффективной работы и удовлетворении потребностей пользователей. Он охватывает широкий спектр аспектов, начиная от архитектурных решений и взаимодействия компонентов приложения до управления данными, производительности и безопасности. На рисунке 2 представлены основные компоненты, определяемые и вносимые в приложение на этапе работы над системным дизайном [5].

На этапе системного дизайна разработчики определяют структуру приложения, включая его модули, интерфейсы и взаимосвязи между ними. Важно учесть масштабируемость системы, чтобы она могла расти и развиваться с увеличением нагрузки и объема данных. Архитектурные решения также включают выбор технологий и платформ, которые поддерживают нужные функциональности.

Системный дизайн охватывает и вопросы управления данными, включая выбор баз данных, их оптимизацию и обеспечение целостности информации. Он также включает в себя стратегии обработки ошибок, обеспечение безопасности данных и пользовательской конфиденциальности. Все эти аспекты вместе обеспечивают надежность, производительность и удобство использования разрабатываемого приложения.

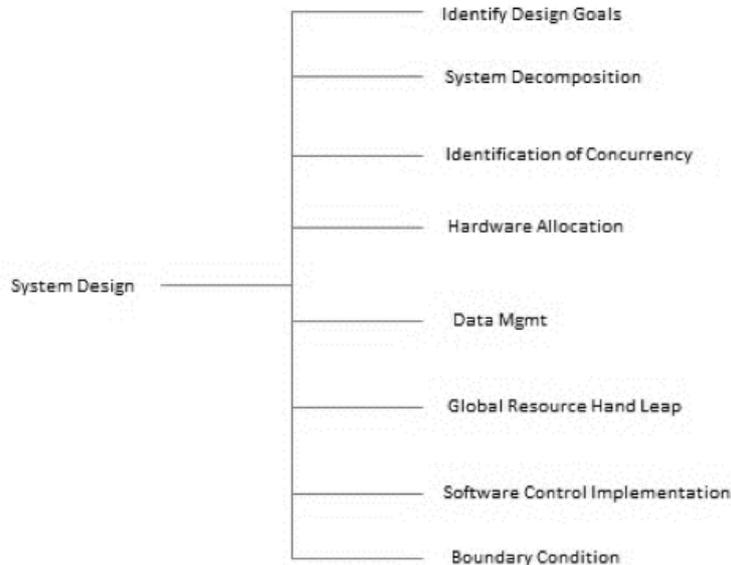


Рисунок 2 – Компоненты, определяемые на этапе системного дизайна

Важно отметить и взаимосвязь между системным дизайном и архитектурой приложения. Системный дизайн и архитектура приложения тесно взаимосвязаны. Системный дизайн определяет общую структуру и организацию приложения, включая его компоненты, модули, интерфейсы и взаимосвязи между ними. Он управляет тем, как различные части приложения взаимодействуют друг с другом и с внешними системами.

Архитектура приложения, с другой стороны, фокусируется на высокоуровневом планировании и организации системы в целом. Это включает выбор подходящих технологий, платформ, архитектурных шаблонов и паттернов для реализации функциональности, определенной в системном дизайне. Архитектурные решения влияют на производительность, масштабируемость, безопасность и общую эффективность приложения [6].

Таким образом, системный дизайн определяет, как разные компоненты приложения должны быть связаны и как они будут взаимодействовать, в то время как архитектура приложения предоставляет инструкции о том, как эти компоненты будут построены и какие технологии будут использоваться для их реализации. Когда эффективно сочетаются системный дизайн и архитектура приложения, они помогают создать устойчивые, гибкие и эффективные программные решения, которые соответствуют требованиям проекта и удовлетворяют потребности пользователей.

Системные дизайны программ могут иметь различные архитектурные подходы в зависимости от конкретных требований, целей и характеристик проекта. Далее представлены некоторые из наиболее популярных и часто используемых типов системных дизайнов:

- монолитная архитектура. В этом подходе весь функционал приложения находится в одном монолитном блоке кода. Это простой способ разработки, но может вызвать проблемы масштабируемости и поддержки при росте проекта;

- архитектура клиент-сервер. Приложение разделяется на две части: клиентскую (интерфейс пользователя) и серверную (обработка данных и бизнес-логика). Этот подход позволяет легче масштабировать и обеспечивает более гибкий контроль над данными;

- архитектура микро-сервисов. Приложение разделяется на небольшие независимые сервисы, каждый из которых выполняет конкретные функции. Это способствует гибкости, масштабируемости и легкости обновления, но требует управления множеством компонентов;

– событийно-ориентированная архитектура. Приложение реагирует на события и сообщения, которые генерируются различными компонентами или внешними системами. Это позволяет создавать высоко отзывчивые и расширяемые системы;

– архитектура потоков данных. В этом подходе данные перемещаются через различные этапы обработки в виде потоков. Это полезно для обработки больших объемов данных в реальном времени;

– архитектура с участием контейнеров и оркестраторов. Использование контейнеров (например, Docker) и оркестраторов (например, Kubernetes) позволяет управлять развертыванием и масштабированием приложений с высокой степенью автоматизации [7].

Каждая из этих архитектур имеет особенности и степени актуальности своего использования при решении той или иной задачи. В таблице 1 отражены результаты анализа, по которому выделены ключевые преимущества и недостатки по архитектурам современных приложений.

Таблица 1 – Анализ архитектур современных приложений

Архитектура	Преимущества	Недостатки
Монолитная архитектура	Простота разработки и тестирования. Единое место для управления и обслуживания.	Ограниченная масштабируемость. Трудности в разделении ответственности между разработчиками. Большие изменения могут повлиять на всю систему.
Архитектура клиент-сервер	Разделение клиентской и серверной частей обеспечивает гибкость. Легче обновлять и масштабировать серверную часть.	Сложнее управление двумя отдельными компонентами. Требуется более сложная сетевая инфраструктура.
Архитектура микро-сервисов	Высокая масштабируемость и гибкость. Отдельные сервисы могут быть разработаны и масштабированы независимо.	Управление множеством сервисов может быть сложным. Сложнее обеспечить связь данных между сервисами.
Событийно-ориентированная архитектура	Высокая отзывчивость и расширяемость. Легкость интеграции с внешними системами.	Сложнее отслеживать и управлять потоками событий. Требуется внимательного управления событиями и обработки ошибок.
Архитектура потоков данных	Обработка данных в реальном времени. Подходит для аналитики и потоковой обработки.	Сложнее в реализации и отладке. Требуется специализированных инструментов.
Архитектура с участием контейнеров и оркестраторов	Упрощает развертывание и масштабирование приложений. Повышает надежность и отказоустойчивость.	Требуется знания и опыта в управлении контейнерами и оркестраторами. Может быть избыточным для небольших проектов.

Каждый из представленных типов архитектур имеет свои преимущества и недостатки. При этом выбор зависит от конкретных потребностей проекта, его масштаба и целей разработки. Также важно отметить, что зачастую в больших и сложных приложениях используется комбинация нескольких архитектурных подходов [8].

**Заключение.** Таким образом, основной целью представленной статьи являлось выполнение анализа по вопросам системного дизайна и архитектур современных приложений. В результате работы актуализирована необходимость детальной проработки будущей программы на этапе системного дизайна. В работе представлен пример работы над системным дизайном с использованием специализированного инструмента, рассмотрены компоненты, задачи и связи приложения, определяемые на этапе системного дизайна. Также в рамках статьи представлены результаты анализа архитектур современных приложений в таких отношениях, как преимущества и недостатки каждой из них.

В заключение необходимо отметить, что именно посредством системного дизайна и соответствующих специальных инструментов представляется возможность создания наиболее устойчивых, масштабируемых и эффективных приложений, способных удовлетворить потребности современных пользователей. Этот подход помогает учесть комплексность взаимо-

действия компонентов приложения и обеспечить его согласованность и удобство использования. Из всего вышеописанного следует, что системный дизайн является ключевой и неотъемлемой частью при проектировании и разработке современных приложений.

### Литература

1. Пащенко, Д. С. Как мировые тенденции в проектировании информационных систем используются в отечественной практике: результаты исследования / Д. С. Пащенко // *Инновации*. – 2018. – № 1 (231). – С. 58–63.
2. Караванов, А. В. Архитектура программного обеспечения для высоконадежных систем / А. В. Караванов, Н. Д. Иванов // *Космические аппараты и технологии*. – 2018. – № 2 (24). – С. 100–104.
3. Парамзина, А. А. Использование case-инструментов при разработке программного обеспечения / А. А. Парамзина, Е. Н. Тищенко // *Экономика и социум*. – 2022. – № 1-2 (92). – С. 118–122.
4. Шайтура, С. В. Системный анализ технологий компьютерных систем и систем связи / С. В. Шайтура, М. А. Жиделев, Д. Ю. Федоров // *Известия ТулГУ. Технич. науки*. – 2023. – № 3. – С. 290–296.
5. Игнатьева, О. В. Архитектурные приемы при разработке программного обеспечения, зависящего от интерфейса пользователя / О. В. Игнатьева, Н. А. Москат, С. С. Рубцова // *ИВД*. – 2022. – № 2 (86). – С. 25–33.
6. Калугян, К.Х. Моделирование процессов контроля качества программного обеспечения / К. Х. Калугян, К. Н. Щербакова, М. В. Глущенко // *SAEC*. – 2020. – № 3. – С. 308–314.
7. Кокурин, Е. А. Исследование и разработка архитектуры информационной системы анализа использования программного обеспечения предприятия / Е. А. Кокурин // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2022. – № 11-2. – С. 103–107.
8. Яровая, Е. В. Принципы построения архитектуры программного обеспечения / Е. В. Яровая // *E-Scio*. – 2022. – № 8 (71). – С. 20–24.

## О классе конечных групп, факторизуемых субнормальными сверхразрешимыми подгруппами

В.С. МОНАХОВ, Д.А. ХОДАНОВИЧ

Устанавливаются общие свойства класса  $\mathfrak{H}$ , состоящего из всех конечных групп, являющихся произведением двух субнормальных сверхразрешимых подгрупп. В частности, доказывается, что класс  $\mathfrak{H}$  является насыщенным гомоморфом, все подгруппы Шмидта в группе  $G \in \mathfrak{H}$  сверхразрешимы, но  $\mathfrak{H}$  не является классом Фиттинга и не является формацией.

**Ключевые слова:** конечная группа, сверхразрешимая подгруппа, субнормальная подгруппа, формация, класс Фиттинга.

We establish the general properties of the  $\mathfrak{H}$  class, which consists of all finite groups that are the product of two subnormal supersoluble subgroups. In particular, it is proved that the class  $\mathfrak{H}$  is a saturated homomorph, all Schmidt subgroups in the group  $G \in \mathfrak{H}$  are supersoluble, but  $\mathfrak{H}$  is not a Fitting class and is not a formation.

**Keywords:** finite group, supersoluble subgroup, subnormal subgroup, formation, Fitting class.

**Введение.** Все обозначения и терминология теории групп и их классов соответствуют [1], [2]. Рассматриваются только конечные группы.

Поскольку произведение нормальных нильпотентных подгрупп является нильпотентной подгруппой, то класс  $\mathfrak{N}$  всех нильпотентных групп является радикальным классом (:= классом Фиттинга). Класс  $\mathfrak{S}$  всех разрешимых групп также радикален. Классы  $\mathfrak{A}$  и  $\mathfrak{U}$  всех абелевых и сверхразрешимых групп не радикальны. На нерадикальность класса  $\mathfrak{A}$  указывает неабелева группа порядка  $p^3$ ,  $p$  – любое простое число. Первый пример, поясняющий нерадикальность класса  $\mathfrak{U}$ , построил Хупперт [3].

**Пример 1** (Хупперт [3]). Пусть  $C_5^2 = \langle a, b \mid a^5 = b^5 = 1, ab = ba \rangle$  – элементарная абелева группа порядка  $5^2$ ,  $Q = \langle c, d \mid c^4 = d^4 = 1, c^2 = d^2, d^{-1}cd = c^{-1} \rangle$  – группа кватернионов порядка 8 и  $G = C_5^2 \times Q_8$  – их полупрямое произведение, которое определяется следующими соотношениями:

$$cac^{-1} = b^{-1}, dad^{-1} = a^3, abc^{-1} = a, dbd^{-1} = b^2.$$

В группе  $G$  имеются три сверхразрешимые подгруппы  $H = C_5^2 \times \langle c \rangle$ ,  $K = C_5^2 \times \langle d \rangle$  и  $L = C_5^2 \times \langle cd \rangle$ , которые нормальны в  $G$  и  $G = HK = HL = KL$ . Коммутант  $G' = C_5^2 \times \langle cd \rangle$  не-нильпотентен, поэтому  $G$  несверхразрешима.

Группы, факторизуемые нормальными сверхразрешимыми подгруппами, изучались в работах [4]–[10]. В частности, первые признаки сверхразрешимости таких факторизуемых групп установили Бэр [4], Фризен [5], А.Ф. и Т.И. Васильевы [6]. В работе [11] показано, что условие нормальности сомножителей в этих признаках можно ослабить до субнормальности.

В итоге получается следующая теорема.

**Теорема А** ([11, теорема 3]). Если  $A$  и  $B$  – субнормальные сверхразрешимые подгруппы группы  $G = AB$ , то  $G$  сверхразрешима в каждом из следующих случаев:

- (1) взаимный коммутант  $[A, B]$  нильпотентен; в частности, коммутант  $G'$  нильпотентен;
- (2) индексы подгрупп  $A$  и  $B$  в группе  $G$  взаимно просты;

(3) в группе  $G$  существует нильпотентная нормальная подгруппа  $W$  такая, что в фактор-группе  $G/W$  все силовские подгруппы абелевы;

(4)  $(G_r)' \leq F(G)$  для каждого  $r \in \pi(G : F(G)A) \cap \pi(G : F(G)B)$ .

Если подгруппы  $A$  и  $B$  нормальны в  $G = AB$ , то в случаях (1)–(3) теорема А превращается соответственно в результаты Бэра [4], Фризен [5] и А.Ф. и Т.И. Васильевых [6]. Теорема А в случае (4) получена в [11] впервые.

Не все признаки сверхразрешимости группы  $G = AB$  с нормальными сверхразрешимыми подгруппами  $A$  и  $B$  переносятся на группы с субнормальными сомножителями. Например, из теоремы А (1) вытекает сверхразрешимость группы  $G = AB$  с нормальными сверхразрешимыми подгруппами  $A$  и  $B$  при условии, что  $A \cap B$  нильпотентна [8, 1.1]. Следующий пример указывает, что в этом утверждении нормальность ни одного из сомножителей нельзя ослабить до субнормальности.

**Пример 2** ([4, с. 186]). Пусть  $C_p^2 = \langle a \rangle \times \langle b \rangle$  – элементарная абелева группа порядка  $p^2$ , простое число  $p \not\equiv 1 \pmod{4}$ ,  $D = \langle c, d \mid c^4 = d^2 = 1, c^d = c^3 \rangle$  – диэдральная группа порядка 8, которая действует на  $C_p^2$  следующим образом:

$$a^c = b^{-1}, b^c = a, a^d = b, b^d = a.$$

Пусть  $G = C_p^2 \rtimes D_8$  – подгруппа из голоморфа  $C_p^2$ . Рассмотрим подгруппы

$$A = C_p^2 \rtimes (\langle c^2 \rangle \times \langle d \rangle), H = C_p^2 \rtimes (\langle c^2 \rangle \times \langle cd \rangle), B = C_p^2 \rtimes (\langle cd \rangle).$$

Подгруппы  $A$  и  $H$  нормальны в  $G$ , поскольку  $|G : A| = |G : H| = 2$ , а  $B$  нормальна в  $H$ , поэтому  $B$  субнормальна в  $G$  и  $G = AH = AB$ . Так как  $\langle ab \rangle$  нормальна в  $A$ , а  $\langle a \rangle$  нормальна в  $H$ , то  $A$  и  $H$  сверхразрешимы. Поскольку  $a^{c^2} = a^{-1}$ , то коммутант  $G' = C_p^2 \rtimes \langle c^2 \rangle = A \cap H$  ненильпотентен и  $G$  несверхразрешима. Ясно, что  $A \cap B = C_p^2$  нильпотентна.  $\square$

В работе [11] установлено также, что сверхразрешимый корадикал группы  $G = AB$  с субнормальными сверхразрешимыми подгруппами  $A$  и  $B$  совпадает с нильпотентным корадикалом коммутанта группы.

Обозначим через  $\mathfrak{H}$  класс всех групп, являющихся произведением двух субнормальных сверхразрешимых подгрупп. Ясно, что  $\mathfrak{U} \subseteq \mathfrak{H} \subseteq \mathfrak{S}$  и любая несверхразрешимая группа с единственной нормальной максимальной подгруппой (например, знакопеременная группа  $A_4$ ) не принадлежит  $\mathfrak{H}$ , т. е.  $\mathfrak{H} \neq \mathfrak{S}$ . Пример Хупперта подтверждает, что  $\mathfrak{U} \neq \mathfrak{H}$ . Поэтому оба включения  $\mathfrak{U} \subseteq \mathfrak{H} \subseteq \mathfrak{S}$  собственные.

В настоящей заметке устанавливаются общие свойства класса  $\mathfrak{H}$  и получен признак сверхразрешимости группы  $G \in \mathfrak{H}$ , уточняющий теорему А (4).

**1. Используемые обозначения и вспомогательные утверждения.** Множество всех натуральных и всех простых чисел обозначается через  $\mathbb{N}$  и  $\mathbb{P}$  соответственно, а  $\pi \subseteq \mathbb{P}$ . Через  $\pi(n)$  обозначается множество всех простых чисел, делящих  $n \in \mathbb{N}$ . Запись  $X \leq Y$ ,  $X < Y$ ,  $X \triangleleft Y$ ,  $X \triangleleft\triangleleft Y$  означает, что  $X$  – подгруппа в группе  $Y$ , соответственно, собственная подгруппа, нормальная подгруппа, субнормальная подгруппа;  $|X|$  – порядок группы  $X$  и  $|X : Y|$  – индекс  $Y \leq X$ . Подгруппы Фиттинга, Фраттини, коммутант и центр группы  $G$  обозначаются через  $F(G)$ ,  $\Phi(G)$ ,  $G'$  и  $Z(G)$  соответственно, а  $G_\pi$  –  $\pi$ -холлова подгруппа группы  $G$ . Если

$$|G| = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_n^{\alpha_n}, p_1 < p_2 < \dots < p_n, \alpha_i \in \mathbb{N}, \forall i,$$

и группа  $G$  имеет нормальный ряд

$$G = G_0 \geq G_1 \geq \dots \geq G_{n-1} \geq G_n = 1, G_i \triangleleft G, \forall i$$

такой, что  $G_{i-1}/G_i$  изоморфна силовской  $p_i$ -подгруппе группы  $G$  для каждого  $i$ , то говорят, что группа  $G$  имеет силовскую башню сверхразрешимого типа. Класс всех групп, имеющих силовские башни сверхразрешимого типа, будем обозначать  $\mathfrak{D}$ , он является наследственной насыщенной радикальной формацией.

Пересечение всех нормальных подгрупп группы  $G$ , фактор-группы по которым принадлежат формации  $\mathfrak{F}$ , обозначается через  $G^{\mathfrak{F}}$  и называется  $\mathfrak{F}$ -корадикалом группы  $G$ . Понятно, что  $G^{\mathfrak{F}}$  – наименьшая нормальная в  $G$  подгруппа, фактор-группа по которой принадлежит  $\mathfrak{F}$ . Если формации  $\mathfrak{X}$  и  $\mathfrak{F}$  таковы, что  $\mathfrak{X} \subseteq \mathfrak{F}$ , то  $G^{\mathfrak{F}} \leq G^{\mathfrak{X}}$ , в частности,  $G^{\mathfrak{U}} \leq G^{\mathfrak{N}} \leq G^{\mathfrak{N}^2} = G'$ .

Пусть  $\mathfrak{X}$  и  $\mathfrak{F}$  – наследственные формации. Согласно [2, с. 191] и [12, с. 337] произведение

$$\mathfrak{X}\mathfrak{F} = \{G \in \mathfrak{E} \mid G^{\mathfrak{F}} \in \mathfrak{X}\}$$

также является наследственной формацией. При  $\mathfrak{F} = \mathfrak{X}$  вместо  $\mathfrak{X}\mathfrak{X}$  пишем  $\mathfrak{X}^2$ . В частности,  $\mathfrak{N}\mathfrak{U}$  – формация всех групп с нильпотентным коммутантом,  $\mathfrak{N}^2$  – формация всех метанильпотентных групп, а  $\mathfrak{N}\mathfrak{U}^2$  – формация всех групп, у которых фактор-группа по подгруппе Фиттинга метабелева. Все три формации  $\mathfrak{N}\mathfrak{U}$ ,  $\mathfrak{N}^2$  и  $\mathfrak{N}\mathfrak{U}^2$  наследственные и насыщенные, формации  $\mathfrak{N}\mathfrak{U}$  и  $\mathfrak{N}\mathfrak{U}^2$  не радикальны, а формация  $\mathfrak{N}^2$  радикальна.

Через  $C_n$  и  $D_n$  обозначаются циклическая и диэдральная группы порядка  $n$ ,  $C_n^2 = C_n \times C_n$ ,  $S_n$  – симметрическая группа степени  $n$ , а запись  $U \rtimes V$  означает группу, которая является полупрямым произведением подгрупп, изоморфных группам  $U$  и  $V$ , с нормальной подгруппой  $U$ .

Группой Шмидта называют ненильпотентную группу с нильпотентными собственными подгруппами. В работе [13] введены и изучены классы групп  $\text{sh}\mathfrak{U}$  и  $\text{sh}\overline{\mathfrak{U}}$ , состоящие из всех групп, в которых каждая подгруппа Шмидта сверхразрешима и несверхразрешима соответственно. Оба класса являются наследственными насыщенными радикальными формациями и полностью описаны группы из этих двух классов. В частности, справедлива

**Лемма 1** [13, теорема 1]. Для группы  $G$  следующие утверждения эквивалентны:

(1)  $G \in \text{sh}\mathfrak{U}$ ;

(2)  $G \in \mathfrak{D}$  и для каждой пары простых чисел  $p > q$ ,  $q$  не делит  $p - 1$ , бипримарная  $\{p, q\}$ -холлова в  $G$  подгруппа нильпотентна.

**Лемма 2.** Если  $p$  и  $q$  – различные простые числа,  $p > q$  и  $q$  не делит  $p - 1$ , то любая сверхразрешимая  $\{p, q\}$ -группа нильпотентна.

**Доказательство.** Предположим противное и пусть  $G$  – ненильпотентная группа минимального порядка, удовлетворяющая условию леммы. Так как  $G$  ненильпотентна, то в  $G$  существует подгруппа Шмидта  $S$ . Для  $S$  выполняются требования леммы, поэтому  $S = G$ . Согласно [13, лемма 1] группа  $G$  имеет порядок  $pq^n$  для некоторого натурального  $n$  и  $q$  делит  $p - 1$ , противоречие. Поэтому предположение неверно и группа нильпотентна.

**2. Общие свойства класса  $\mathfrak{H}$ .** Нам потребуется следующая лемма.

**Лемма 3** [11, лемма 9]. Пусть группа  $G = AB$  является произведением субнормальных сверхразрешимых подгрупп  $A$  и  $B$ . Тогда справедливы следующие утверждения:

(1) группа  $G$  имеет силовскую башню сверхразрешимого типа;

(2) фактор-группа  $G/F(G)$  нильпотентна и является произведением двух субнормальных абелевых подгрупп  $AF(G)/F(G)$  и  $BF(G)/F(G)$ .

**Теорема 1.** (1)  $\mathfrak{H}$  – гомоморф, т. е. если  $G \in \mathfrak{H}$  и  $N \triangleleft G$ , то  $G/N \in \mathfrak{H}$ .

(2)  $\mathfrak{H}$  замкнут относительно прямых произведений, т. е. если  $G_i \in \mathfrak{H}$ ,  $i = 1, 2$ , то  $G_1 \times G_2 \in \mathfrak{H}$ .

(3)  $\mathfrak{H}$  замкнут относительно холловых подгрупп, т. е. если  $G \in \mathfrak{H}$ , то  $G_\pi \in \mathfrak{H}$  для всех  $\pi \subseteq \pi(G)$ .

(4)  $\mathfrak{H}$  – насыщенный класс, т. е. если  $G/\Phi(G) \in \mathfrak{H}$ , то  $G \in \mathfrak{H}$ .

(5) Если  $Z$  – циклическая нормальная подгруппа в  $G$ , или  $Z \leq Z(G)$ , и  $G/Z \in \mathfrak{H}$ , то  $G \in \mathfrak{H}$ .

(6) Класс  $\mathfrak{H}$  не замкнут относительно нормальных подгрупп, в частности, класс  $\mathfrak{H}$  не является классом Фиттинга.

(7) Класс  $\mathfrak{H}$  не является классом Шунка и не является формацией.

(8)  $\mathfrak{U} \subset \mathfrak{H} \subset \mathfrak{D} \cap \mathfrak{N}^2 \cap \mathfrak{N}\mathfrak{U}^2$ .

(9) Минимальная несверхразрешимая группа  $G \in \mathfrak{H}$  тогда и только тогда, когда  $G$  – би-примарная минимальная несверхразрешимая группа с нециклическими силовскими подгруппами.

(10)  $\mathfrak{H} \subseteq \text{sh}\mathfrak{U} \cap \mathfrak{N}^2 \cap \mathfrak{NA}^2$ . В частности, каждая подгруппа Шмидта группы  $G \in \mathfrak{H}$  сверхразрешима.

**Доказательство.** (1) Если  $G \in \mathfrak{H}$ , то  $G = AB$ , подгруппы  $A$  и  $B$  субнормальны в  $G$  и сверхразрешимы. Поскольку  $G/N = (AN/N)(BN/B)$ , подгруппы  $AN/N \cong A/A \cap N$  и  $BN/N \cong B/B \cap N$  субнормальны в  $G/N$  и сверхразрешимы, то  $G/N \in \mathfrak{H}$ .

(2) Если  $G_i \in \mathfrak{H}$ ,  $i=1,2$ , то  $G_i = A_i B_i$ , подгруппы  $A_i$  и  $B_i$  субнормальны в  $G_i$  и сверхразрешимы. Поскольку  $G_1 \times G_2 = (A_1 \times A_2)(B_1 \times B_2)$ , подгруппы  $A_1 \times A_2$  и  $B_1 \times B_2$  субнормальны в  $G_1 \times G_2$  и сверхразрешимы, то  $G_1 \times G_2 \in \mathfrak{H}$ .

(3) Если  $G \in \mathfrak{H}$ , то  $G = AB$ , подгруппы  $A$  и  $B$  субнормальны в  $G$  и сверхразрешимы. Поскольку группа  $G$  разрешима, то для любого множества  $\pi \subseteq \pi(G)$  согласно [14, VI. 4.7] существуют  $\pi$ -холловы подгруппы  $G_\pi$ ,  $A_\pi$  и  $B_\pi$  такие, что  $G_\pi = A_\pi B_\pi$ . Поскольку  $A \triangleleft\triangleleft G$  и  $A_\pi = A \cap G_\pi$ , то  $A_\pi \triangleleft\triangleleft G_\pi$  и  $A_\pi$  сверхразрешима. Аналогично,  $B_\pi \triangleleft\triangleleft G_\pi$  и  $B_\pi$  сверхразрешима. Поэтому  $G_\pi \in \mathfrak{H}$ .

(4) Если  $G/\Phi(G) \in \mathfrak{H}$ , то  $G/\Phi(G) = (A/\Phi(G))(B/\Phi(G))$ , подгруппы  $A/\Phi(G)$  и  $B/\Phi(G)$  субнормальны в  $G/\Phi(G)$  и сверхразрешимы. Согласно [15, theorem 3.1] подгруппы  $A$  и  $B$  сверхразрешимы. Поскольку подгруппы  $A$  и  $B$  субнормальны в  $G$ , то  $G \in \mathfrak{H}$ .

(5) Пусть  $Z \triangleleft G$  и  $G/Z \in \mathfrak{H}$ . Тогда  $G/Z = (A/Z)(B/Z)$ , подгруппы  $A/Z$  и  $B/Z$  сверхразрешимы и субнормальны в  $G/Z$ . Ясно, что  $G = AB$ , подгруппы  $A$  и  $B$  субнормальны в  $G$ . Если  $Z$  циклическая или  $Z \leq Z(G)$ , то подгруппы  $A$  и  $B$  сверхразрешимы [2, 4.46] и  $G \in \mathfrak{H}$ .

(6) Группа  $C_3^2 \rtimes D_8 = S_3 \wr C_2$  [16, SmallGroup(72,40)] содержит две нормальные подгруппы  $A$  и  $B$ ,  $A \cong B \cong S_3 \times S_3$ , и нормальную подгруппу  $C_3^2 \rtimes C_4$ . Поэтому  $C_3^2 \rtimes D_8 = AB \in \mathfrak{H}$ . Подгруппа  $C_3^2 \rtimes C_4$  [16, SmallGroup(36,4)] несверхразрешима и имеет единственную максимальную нормальную подгруппу  $C_3^2$ , поэтому  $C_3^2 \rtimes C_4 \notin \mathfrak{H}$ . Поэтому класс  $\mathfrak{H}$  не замкнут относительно нормальных подгрупп. В частности, он не является классом Фиттинга.

(7) Класс  $\mathfrak{H}$  не является классом Шунка согласно [17]. Класс  $\mathfrak{H}$  не является формацией, поскольку  $\mathfrak{H}$  – насыщенный класс по утв. (4), а каждая насыщенная формация является классом Шунка [2, 5.3].

(8) Включения  $\mathfrak{U} \subseteq \mathfrak{H} \subseteq \mathfrak{D} \cap \mathfrak{N}^2 \cap \mathfrak{NA}^2$  следуют из леммы 3. Так как  $\mathfrak{U}$  и  $\mathfrak{D} \cap \mathfrak{N}^2 \cap \mathfrak{NA}^2$  – наследственные классы, а класс  $\mathfrak{H}$  ненаследственный в силу утв. (6), то  $\mathfrak{U} \neq \mathfrak{H} \neq (\mathfrak{D} \cap \mathfrak{N}^2 \cap \mathfrak{NA}^2)$ .

(9) Минимальные несверхразрешимые группы описаны в [18]–[20]. Пусть  $G$  – минимальная несверхразрешимая группа и  $G$  является произведением двух субнормальных сверхразрешимых подгрупп  $A$  и  $B$ . Группа  $G = G^{\mathfrak{U}} \rtimes T$  разрешима,  $|\pi(G)| \leq 3$ , [18, теорема 22], подгруппа  $P = G^{\mathfrak{U}}$  является силовской  $p$ -подгруппой для некоторого  $p \in \pi(G)$ . Согласно [11, лемма 10] подгруппы  $AP$  и  $BP$  сверхразрешимы и субнормальны в  $G$ , поэтому можно считать, что  $P \leq A \cap B$ . Теперь  $A = P \rtimes (A \cap T)$ ,  $B = P \rtimes (B \cap T)$  и можно считать, что  $T = (A \cap T)(B \cap T)$ . Так как  $A$  и  $B$  субнормальны в  $G$ , то  $A \cap T$  субнормальна в  $T$ ,  $B \cap T$  субнормальна в  $T$ . Если  $T$  – циклическая примарная подгруппа, то либо  $A \cap T \leq B \cap T = T$ , либо  $B \cap T \leq A \cap T = T$  и соответственно, либо  $G = B$ , либо  $G = A$ , т. е.  $G$  сверхразрешима, противоречие. Далее считаем, что  $T$  не является циклической примарной подгруппой.

Пусть  $\Phi(G) = 1$ . Тогда  $P = C_G(P)$  – минимальная нормальная в  $G$  подгруппа порядка  $> p$ , [19, теорема 1 (a)]. Если  $|\pi(T)| = 2$ , то  $T = R \rtimes Q$ , где  $R$  и  $Q$  – циклические силовские  $r$ - и

$q$ -подгруппы [20]. Так как примарная циклическая группа не факторизуется собственными подгруппами, то можно считать, что  $(A \cap T) = R$ ,  $(B \cap T) = Q$ . Но теперь  $Q = B \cap T$  субнормальна в  $T$ , что невозможно, поскольку  $T$  нециклическая.

Пусть  $|\pi(T)| = 1$ . Тогда  $T$  нециклическая.

Если  $\Phi(G) \neq 1$ , то фактор-группа  $G/\Phi(G) \in \mathfrak{H}$  по утв. (1) и  $G/\Phi(G)$  – минимальная несверхразрешимая группа. Так как  $\Phi(G/\Phi(G)) = 1$ , то  $G/\Phi(G)$  – бипримарная группа с нециклическими силовскими подгруппами. Следовательно,  $G$  – бипримарная группа с нециклическими силовскими подгруппами.

Обратно, пусть  $G = P \rtimes T$  – бипримарная минимальная несверхразрешимая группа с нециклическими силовскими подгруппами. Тогда в  $T$  существуют две различные максимальные подгруппы  $T_1$  и  $T_2$ . Ясно, что  $G = (P \rtimes T_1)(P \rtimes T_2)$ , где  $P \rtimes T_1$  и  $P \rtimes T_2$  – нормальные в  $G$  сверхразрешимые подгруппы.

(10) Предположим, что  $\mathfrak{H}$  не содержится в  $\text{sh}\mathfrak{U}$  и пусть  $G$  – группа наименьшего порядка из  $\mathfrak{H} \setminus \text{sh}\mathfrak{U}$ . Согласно лемме 1 для некоторых простых чисел  $p > q$ ,  $q$  не делит  $p - 1$ , подгруппа  $H = G_{\{p,q\}}$  ненильпотентна. Согласно доказанному утв. (3) подгруппа  $H \in \mathfrak{H}$ . Если  $H < G$ , то  $H \in \text{sh}\mathfrak{U}$  по выбору группы  $G$ . По лемме 1 подгруппа  $H$  нильпотентна, противоречие. Поэтому  $H = G - \{p, q\}$ -группа и силовская  $p$ -подгруппа  $P = G_p$  нормальна в  $G$  по утв. (8). Поскольку  $G \in \mathfrak{H}$ , то  $G = AB$ , подгруппы  $A$  и  $B$  субнормальны в  $G$  и сверхразрешимы. Согласно [11, лемма 10] подгруппа  $AP$  сверхразрешима, а по лемме 2 она нильпотентна. Аналогично, подгруппа  $BP$  нильпотентна. Поскольку подгруппы  $AP$  и  $BP$  субнормальны в  $G$ , то группа  $G$  нильпотентна и  $G \in \mathfrak{N} \subseteq \text{sh}\mathfrak{U}$ . Теорема 1 доказана.

Радикальная насыщенная формация  $\text{sh}\mathfrak{U}$  содержит насыщенный гомоморф  $\mathfrak{H}$  и три нерадикальные насыщенные формации  $\mathfrak{U}$ ,  $w\mathfrak{U}$  и  $v\mathfrak{U}$ , причем  $\mathfrak{U} \subset w\mathfrak{U} \subset v\mathfrak{U} \subset \text{sh}\mathfrak{U}$ , [21]. Соотношения между ними описывает

**Следствие 1.1.**  $\mathfrak{U} = \mathfrak{H} \cap w\mathfrak{U} \subset \mathfrak{H} \cap v\mathfrak{U}$ .

**Доказательство.** Так как  $\mathfrak{U} \subset \mathfrak{H}$  и  $\mathfrak{U} \subset w\mathfrak{U} \subset v\mathfrak{U}$  согласно [21, с. 359], то  $\mathfrak{U} \subseteq (\mathfrak{H} \cap w\mathfrak{U}) \subseteq (\mathfrak{H} \cap v\mathfrak{U})$ . Если  $G \in \mathfrak{H} \cap w\mathfrak{U}$ , то по теореме 1 (10) группа  $G$  метанильпотентна, а согласно [21, теореме 1 (1)] она сверхразрешима и  $\mathfrak{U} = \mathfrak{H} \cap w\mathfrak{U}$ . Включение  $(\mathfrak{H} \cap w\mathfrak{U}) \subseteq (\mathfrak{H} \cap v\mathfrak{U})$  собственное. Несверхразрешимая группа  $C_5^2 \times Q_8$  из примера 1 является произведением двух нормальных сверхразрешимых подгрупп, изоморфных  $C_5^2 \times C_4$ . Эта группа принадлежит  $(\mathfrak{H} \cap v\mathfrak{U}) \setminus w\mathfrak{U}$ , [21, пример 3].

**3. Признак сверхразрешимости группы из класса  $\mathfrak{H}$ .** Обозначим через  $\mathcal{A}_\pi$  – класс всех групп с абелевыми силовскими  $p$ -подгруппами для каждого  $p \in \pi$ . При  $\pi = \mathbb{P}$  вместо  $\mathcal{A}_\pi$  будем писать  $\mathcal{A}$ . Класс  $\mathcal{A}$  – наследственная формация, но она не насыщенная и не радикальная. Поскольку  $\mathcal{A}_\pi = \mathcal{A} \cap \mathfrak{G}_\pi$ , то класс  $\mathcal{A}_\pi$  – наследственная формация. Любая неабелева  $p$ -группа порядка  $p^3$ ,  $p \in \pi$ , указывает на то, что формация  $\mathcal{A}_\pi$  не насыщенная и не радикальная. Поскольку  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{A}_\pi$ , то  $G^{\mathcal{A}_\pi} \leq G^{\mathcal{A}}$  для любой группы  $G$ .

Следующая теорема устанавливает признак сверхразрешимости группы из класса  $\mathfrak{H}$ , поглощающий, в частности, теорему А (4).

**Теорема 2.** Пусть  $A$  и  $B$  – субнормальные сверхразрешимые подгруппы группы  $G = AB$  и  $\sigma = \pi(G : F(G)A) \cap \pi(G : F(G)B)$ . Если подгруппа  $G^{\mathcal{A}_\sigma}$  нильпотентна, то  $G$  сверхразрешима.

**Доказательство.** Если  $q \notin \sigma$ , то  $q \notin \pi(G : F(G)A)$  или  $q \notin \pi(G : F(G)B)$ . Поскольку  $AF(G)/F(G)$  и  $BF(G)/F(G)$  абелевы согласно лемме 3 (2), то  $G_q F(G)/F(G)$  абелева. Если  $q \in \sigma$ , то  $G_q' \leq G^{\mathcal{A}_\sigma} \leq F(G)$  и  $G_q F(G)/F(G)$  опять абелева. Так как  $G \in \mathfrak{N}^2$  по теореме 1 (10), то  $G/F(G) \in \mathfrak{N}$  и все силовские подгруппы в  $G/F(G)$  абелевы. Поэтому  $G' \leq F(G)$  и  $G$  сверхразрешима согласно теореме 1 (1).

**Следствие 2.1.** Если  $G = AB \in \mathfrak{H}$  и  $(|G : F(G)A|, |G : F(G)B|) = 1$ , то  $G \in \mathfrak{U}$ .

**Следствие 2.2.** Если  $G = AB \in \mathfrak{H}$  и  $(|G : A|, |G : B|) = 1$ , то  $G \in \mathfrak{U}$ .

В случае, когда сверхразрешимые подгруппы  $A$  и  $B$  нормальны в  $G = AB$ , это следствие превращается в теорему Фризен [5].

**Следствие 2.3.**  $\mathfrak{H} \cap \mathfrak{NA} = \mathfrak{H} \cap \mathfrak{NA} = \mathfrak{U}$ .

В случае, когда сверхразрешимые подгруппы  $A$  и  $B$  нормальны в  $G = AB$ , равенство  $\mathfrak{H} \cap \mathfrak{NA} = \mathfrak{U}$  превращается в теорему Бэра [4], а равенство  $\mathfrak{H} \cap \mathfrak{NA} = \mathfrak{U}$  – в теорему А.Ф. и Т.И. Васильевых [6].

*Исследования поддержаны Министерством образования Республики Беларусь, грант № 20211780, «Конвергенция-2025».*

## Литература

1. Шеметков, Л. А. Формации конечных групп / Л. А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 271 с.
2. Монахов, В. С. Введение в теорию конечных групп и их классов / В. С. Монахов. – Минск : Высшейшая школа, 2006. – 207 с.
3. Huppert, B. Monomiale darstellung endlicher gruppen / B. Huppert // Nagoya Math. J. – 1953. – Vol. 3. – P. 93–94.
4. Baer, R. Classes of finite groups and their properties / R. Baer // Illinois J. Math. – 1957. – Vol. 1. – P. 115–187.
5. Friesen, D. Products of normal supersolvable subgroups / D. Friesen // Proc. Amer. Math. Soc. – 1971. – Vol. 30, № 1. – P. 46–48.
6. Васильев, А. Ф. О конечных группах, у которых главные факторы являются простыми группами / А. Ф. Васильев, Т. И. Васильева // Изв. вузов. Матем. – 1997. – № 11 (426). – С. 10–14.
7. Guo, W. Finite minimal non-supersolvable groups decomposable into the product of two normal supersolvable subgroups / W. Guo, A. S. Kondratiev // Commun. Math. Stat. – 2015. – Vol. 3. – P. 285–290.
8. Монахов, В. С. О  $p$ -сверхразрешимости конечной факторизуемой группы с нормальными множителями / В. С. Монахов, И. К. Чирик // Труды Института математики и механики УрО РАН. – 2015. – № 3 (21). – С. 256–267.
9. Монахов, В. С. О  $p$ -сверхразрешимом корадикале произведения нормальных  $p$ -сверхразрешимых подгрупп / В. С. Монахов, И. К. Чирик // Труды Ин-та матем. НАН Беларуси. – 2015. – № 2 (23). – С. 88–96.
10. Тан, С. Конечные группы, являющиеся произведением нормальных сверхразрешимых подгрупп / С. Тан, Ю. Е. В. Го // Сиб. матем. журн. – 2017. – Том 58, № 2. – С. 417–429.
11. Монахов, В. С. О сверхразрешимом корадикале произведения субнормальных сверхразрешимых подгрупп / В. С. Монахов, И. К. Чирик // Сиб. матем. журн. – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 353–364.
12. Doerk, K. Finite soluble groups / K. Doerk, T. Hawkes. – Berlin; New York, 1992. – 891 p.
13. Монахов, В. С. О конечных группах с заданными наборами подгрупп Шмидта / В. С. Монахов // Матем. заметки. – 1995. – Т. 58, № 5. – P. 717–722.
14. Huppert, B. Endliche Gruppen I / B. Huppert. – Berlin; Heidelberg; New York : Springer, 1967. – 792 s.
15. Ballester-Bolinches, A. On  $\mathfrak{F}$ -subnormal subgroups and Frattine-like subgroups of a finite group / A. Ballester-Bolinches, M. D. Perez-Ramos // Glasgow. Math. J. – 1994. – Vol. 36. – P. 241–247.
16. A system for computational discrete algebra GAP 4.11.1 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.gap-system.org>. – Date of access : 25.12.2022.
17. Hawkes, T. Closure operations for Schunck classes / T. Hawkes // J. Austr. Math. Soc. – 1973. – Vol. 16. – P. 316–318.
18. Huppert, B. Normalteiler und maximale Untergruppen endlicher Gruppen / B. Huppert // Mathematische Zeitschrift. – 1954. – Bd. 60. – S. 409–434.
19. Doerk, K. Minimal nicht überauflösbare, endliche Gruppen / K. Doerk // Mathematische Zeitschrift. – 1966. – Bd. 91. – S. 198–205.
20. Нагребецкий, В. Т. О конечных минимальных несверхразрешимых группах / В. Т. Нагребецкий // Конечные группы : сб. науч. ст. – Минск : Наука и техника, 1975. – С. 104–108.
21. Монахов, В. С. О трех формациях над  $\mathfrak{U}$  / В. С. Монахов // Матем. заметки. – 2021. – Т. 110, № 3. – С. 358–367.

## Сети Джексона с однолинейными станциями и экспоненциальными ограничениями на времена ожидания требований

В.А. НЕМИЛОСТИВАЯ, Ю.В. МАЛИНКОВСКИЙ

Рассмотрена экспоненциальная сеть обслуживания с однолинейными станциями, отличающаяся от сети Джексона только тем, что время ожидания требованиями обслуживания на станциях сети ограничено случайной величиной, имеющей показательное распределение. Требования, обслуженные в узлах, и требования, не дождавшиеся обслуживания, движутся по сети в соответствии с разными матрицами маршрутизации. Доказано, что не существует стационарного распределения в мультипликативной форме.

**Ключевые слова:** открытая сеть массового обслуживания, матрицами маршрутизации, стационарное распределение, условия эргодичности.

An exponential service network with single-line stations is considered, which differs from the Jackson network only in that the waiting time for service requirements at the network stations is limited by a random variable with an exponential distribution. Requests served at nodes and those that were not served move through the network according to different routing matrices. It is proved that there is no stationary distribution in multiplicative form.

**Keywords:** open queuing network, routing matrices, stationary distribution, ergodicity conditions.

**Введение.** С развитием информационной сферы возникает необходимость исследования математических моделей сетей массового обслуживания различного типа с целью оптимизации процессов обслуживания. В настоящее время методы и результаты теории массового обслуживания с успехом используются при решении проблем теории надёжности, анализе процессов функционирования сложных систем, разработке автоматизированных систем управления различных видов и во многих других технических, социальных и экономических областях. Возникает потребность в исследовании новых, более сложных видов систем массового обслуживания.

В работах О.В. Якубович и В.Е. Евдокимович [1], [2] исследовалось стационарное распределение вероятностей состояний открытых сетей с различными типами положительных, отрицательных заявок и сигналов и временами пребывания положительных заявок в узлах, ограниченными показательными, распределёнными случайными величинами. Открытые сети с временами пребывания требований, ограниченными показательно рассматривались Ю.Е. Летунович в [3] и О.В. Якубович в [4]. Однако во всех этих работах [1]–[6] предполагалось, что требования, обслуженные в узлах, и заявки, не дождавшиеся обслуживания, ведут себя одинаково, т. е. их движение по сети определяется одной и той же матрицей маршрутизации.

В настоящей статье рассмотрена экспоненциальная сеть обслуживания с однолинейными станциями, отличающаяся от сети Джексона тем, что время ожидания требованиями обслуживания на станциях сети ограничено случайной величиной, имеющей показательное распределение. Требования, обслуженные в узлах, и требования, не дождавшиеся обслуживания, движутся по сети в соответствии с разными матрицами маршрутизации. Доказано, что в общем случае не существует стационарного распределения в мультипликативной форме.

**1. Постановка задачи.** В сеть массового обслуживания, состоящую из  $N$  однолинейных станций (систем), поступает простейший поток требований с интенсивностью  $\lambda$ . Каждое поступающее требование независимо от других требований с вероятностью  $p_{0i}$  направляется

на  $i$ -ю станцию ( $i = \overline{1, N}$ ,  $\sum_{i=1}^N p_{0i} = 1$ ). Число мест для ожидания требований на станциях бесконечное. Время обслуживания требования единственным прибором  $i$ -й станции имеет показательное распределение с параметром  $\mu_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ). Время ожидания начала обслужива-

ния требования в  $i$ -й станции является случайной величиной, условное распределение которой (если на  $i$ -й станции находится  $n_i$  требований) показательное с параметром  $\frac{V_i}{n_i}$  ( $i = \overline{1, N}$ ).

Другими словами, условная вероятность того, что длительность ожидания начала обслуживания каждого требования в  $i$ -й станции закончится в промежутке времени  $[t, t+h)$ , если в момент  $t$  на станции находилось  $n_i$  требований, равна  $\frac{V_i}{n_i}h + o(h)$  при  $h \rightarrow 0$ , а условная вероят-

ность завершения процесса ожидания хотя бы одного из этих требований равна  $v_i h + o(h)$ . Если требование поступает на станцию, свободную от требований, оно сразу начинает обслуживаться. Для определённости будем предполагать, что требования обслуживаются в порядке поступления на станцию (дисциплина FCFS). Предполагается, что промежутки времени между моментами поступления требований, времена обслуживания требований и времена ожидания требований в узлах – независимые случайные величины. Требование, обслуженное в  $i$ -й станции, мгновенно и независимо от других требований с вероятностью  $p_{ij}$  переходит в  $j$ -ую стан-

цию, а с вероятностью  $p_{i0}$  покидает сеть ( $i, j = \overline{1, N}$ ,  $\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1$ ). Требование, время ожидания которого в  $i$ -й станции закончилось, мгновенно и независимо от других требований с вероят-

ностью  $r_{ij}$  направляется в  $j$ -ую станцию, а с вероятностью  $r_{i0}$  покидает сеть ( $i, j = \overline{1, N}$ ,

$\sum_{j=0}^n r_{ij} = 1$ ). Для удобства введём ещё узел 0, который отождествим с внешностью сети. Введём

также следующие две стохастические квадратные матрицы порядка  $N+1$ :

$$P = \begin{pmatrix} 0 & p_{01} & p_{02} & \cdots & p_{0N} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{N0} & p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} 0 & r_{01} & r_{02} & \cdots & r_{0N} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{N0} & r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NN} \end{pmatrix},$$

которые назовём матрицами маршрутизации соответственно обслуженных и не дождавшихся обслуживания требований. Итак,  $p_{00} = r_{00} = 0$ ,  $r_{0j} = p_{0j}$  для остальных  $j$ . Очевидно, матричная функция  $S(n) = (s_{ij}(n_i), i, j = \overline{0, N})$ , где для  $i \neq 0$   $s_{ij}(n_i) = \frac{\mu_i p_{ij} + v_i r_{ij} I_{\{n_i \neq 1\}}}{\mu_i + v_i I_{\{n_i \neq 1\}}}$ ,  $I_A$  – индикатор события  $A$ , равный 1, если  $A$  происходит, и 0 в противном случае, а  $s_{0j}(0) = s_{0j} = p_{0j}$ , элементы  $i$ -й строки которой зависят от числа  $n_i$  требований на  $i$ -й станции, также является стохастической матрицей и по смыслу управляет движением требований по станциям  $0, 1, \dots, N$  без учёта того, за счёт чего (окончания обслуживания или ожидания) требование покидает станцию. Для  $i = 0$  это следует из постановки задачи, а для  $i \neq 0$

$$\sum_{j=0}^N s_{ij}(n_i) = \frac{1}{\mu_i + v_i I_{\{n_i \neq 1\}}} \left( \mu_i \sum_{j=0}^N p_{ij} + v_i I_{\{n_i \neq 1\}} \sum_{j=0}^N r_{ij} \right) = \frac{1}{\mu_i + v_i I_{\{n_i \neq 1\}}} (\mu_i + v_i I_{\{n_i \neq 1\}}) = 1.$$

Будем называть эту матрицу  $S(n)$  матрицей маршрутизации. Заметим, что в отличие от сети Джексона, в которой матрица маршрутизации не зависит от  $\mu_i, i = \overline{1, N}$ , и от сети с ограничением на время пребывания, в которой матрица маршрутизации зависит от  $\mu_i, v_i, i = \overline{1, N}$  и не зависит от чисел требований в узлах, матрица маршрутизации исследуемой сети зависит от  $\mu_i, v_i, i = \overline{1, N}$ , а ее  $i$ -я строка специальным достаточно простым образом зависит от числа требований на  $i$ -й станции.

Заметим, что если положить  $r_{i0} = 1$ ,  $i = \overline{1, N}$ , то не дождавшиеся обслуживания требования после обслуживания на станциях будут покидать сеть, а если положить  $p_{i0} = 1$ ,  $i = \overline{1, N}$ , то, наоборот, покидать сеть будут обслуженные на станциях требования.

Обозначим через  $\lambda \varepsilon_i(n_i)$  условную интенсивность потока требований, выходящего из  $i$ -й станции, находящейся в состоянии  $n_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ). Так как требования не рождаются и не теряются при прохождении станций, то в стационарном режиме с точностью до множителя  $\lambda$  (на который можно сократить) выполняется следующий закон сохранения:

$$\varepsilon_j(n_j) = p_{0j} + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) s_{ij}(n_i - 1), \quad j = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Далее предполагается, что матрица  $S(n)$  неприводима. Для её неприводимости достаточно (но не необходимо), чтобы неприводимой была хотя бы одна из матриц  $P$  или  $R$ . Тогда уравнение (1), которое будем называть уравнением трафика, при фиксированных  $\mu_i, \nu_i, n_1, n_2, \dots, n_N$ ,  $i = \overline{1, N}$ , будет иметь единственное положительное решение. Если изменять эти параметры, то решения (1) будут функциями от них. Заметим, что в классической сети Джексона решение уравнения трафика определяется матрицей  $P$  и не зависит от параметров  $\mu_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

**Лемма 1.** При выполнении (1)

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) s_{i0}(n_i - 1) = 1. \quad (2)$$

Складывая (1) по  $j = 1, 2, \dots, N$  и используя стохастичность матрицы  $S(n)$ , получим

$$\sum_{j=1}^N \varepsilon_j(n_j) = 1 + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) \sum_{j=1}^N s_{ij}(n_i - 1) = 1 + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) (1 - s_{i0}(n_i - 1)) = 1 + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) - \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) s_{i0}(n_i - 1),$$

откуда вытекает (2). Физический смысл состоит в том, что (2), умноженное на  $\lambda$ , выражает равенство интенсивностей выходящего из сети и входящего в сеть потоков требований.

**2. Уравнения глобального и локального равновесия.** Состояния сети в момент  $t$  будем описывать марковским процессом или цепью Маркова с непрерывным временем  $n(t) = (n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t))$ , где  $n_i(t)$  – число требований на  $i$ -й станции в момент времени  $t$ . Пространство состояний этого процесса  $X = Z_+^N$ , где  $Z_+ = \{0, 1, \dots\}$ . В силу неприводимости матрицы маршрутизации и положительности интенсивностей выхода из состояний в моменты ее скачков  $n(t)$ , очевидно, – неприводимая цепь Маркова. Об условиях её эргодичности, которые далее предполагаются выполненными, будет сказано ниже. Пусть  $\{p(n), n \in X\}$  – её предельное эргодическое распределение, которое в этом случае будет единственным решением уравнений глобального равновесия

$$p(n) \left[ \lambda + \sum_{i=1}^N (\mu_i (1 - p_{ii}) + \nu_i (1 - r_{ii}) I_{\{n_i \neq 1\}}) I_{\{n_i \neq 0\}} \right] = \sum_{i=1}^N p(n - e_i) \lambda p_{0i} + \sum_{i=1}^N p(n + e_i) (\mu_i p_{i0} + \nu_i r_{i0} I_{\{n_i \neq 0\}}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N p(n + e_j - e_i) (\mu_j p_{ji} + \nu_j r_{ji} I_{\{n_j \neq 0\}}), \quad n \in X, \quad (3)$$

удовлетворяющим условию нормировки  $\sum_{n \in X} p(n) = 1$ . Здесь  $e_i$  – единичный вектор  $i$ -го направления, причём предполагается, что  $p(n) = 0$  при  $n \in X$ . Разобьем (3) на уравнения локального равновесия. Первое уравнение получается, если приравнять интенсивность потока вероятности из состояния  $n$  за счёт поступления требований в сеть извне интенсивности потока вероятности в состояние  $n$  за счёт ухода требований из сети:

$$\lambda p(n) = \sum_{i=1}^N p(n + e_i) (\mu_i p_{i0} + \nu_i r_{i0} I_{\{n_i \neq 0\}}), \quad n \in X. \quad (4)$$

Остальные  $N$  уравнений локального равновесия получаются, если для каждой станции приравнять интенсивность потока вероятности из состояния  $n$  за счёт ухода требований из этой станции интенсивности потока вероятности в состояние  $n$  за счёт поступления требований на эту станцию (извне и из других станций)

$$p(n)(\mu_i(1-p_{ii})+v_i(1-r_{ii})I_{\{n_i \neq 1\}}) = p(n-e_i)\lambda p_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N p(n+e_j-e_i)(\mu_j p_{ji} + v_j r_{ji} I_{\{n_j \neq 0\}}), \quad n \in X, i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Так как (3) получается сложением (4) с просуммированными по  $i = \overline{1, N}$  уравнениями (5), то всякое решение локальных уравнения равновесия (4), (5) будет являться решением глобального уравнения равновесия (3).

**3. Изолированный от сети узел в искусственной случайной среде.** Изолируем  $i$ -ю станцию от сети, помещая её в фиктивную случайную среду, отличающуюся от условий её функционирования в сети только тем, что в неё поступает поток моментов последовательных скачков процесса чистого размножения с интенсивностью рождения  $\lambda \varepsilon_i(n_i)$ , зависящей от числа требований  $n_i$  в этой станции. Получается процесс размножения и гибели  $\tilde{n}_i(t)$  с интенсивностями рождения  $\lambda \varepsilon_i(n_i)$  ( $n_i = 0, 1, \dots$ ) и интенсивностями гибели  $\mu_i + v_i I_{\{n_i \neq 1\}}$  ( $n_i = 1, 2, \dots$ ). При этом стационарные вероятности цепи Маркова  $\tilde{n}_i(t)$ , если они существуют, удовлетворяют следующим уравнениям равновесия для вертикальных сечений в графе переходов процесса размножения и гибели:

$$\lambda \varepsilon_i(n_i - 1) p_i(n_i - 1) = (\mu_i + v_i I_{\{n_i \neq 1\}}) p_i(n_i) \quad (n_i = 1, 2, \dots), \quad (6)$$

Эта система уравнений может быть записана в виде

$$\lambda \varepsilon_i(0) p_i(0) = \mu_i p_i(1), \quad (7)$$

$$\lambda \varepsilon_i(n_i - 1) p_i(n_i - 1) = (\mu_i + v_i) p_i(n_i), \quad (n_i = 2, 3, \dots). \quad (8)$$

Из уравнений (7), (8) находим

$$p_i(n_i) = p_i(0) \frac{1}{\mu_i (\mu_i + v_i)^{n_i - 1}} \prod_{l=0}^{n_i - 1} (\lambda \varepsilon_i(l)). \quad (9)$$

Из условия нормировки следует, что

$$p_i(0) = \left( 1 + \frac{\mu_i + v_i}{\mu_i} \sum_{n_i=1}^{\infty} \prod_{l=0}^{n_i-1} \frac{\lambda \varepsilon_i(l)}{\mu_i + v_i} \right)^{-1} \quad (10)$$

и кроме того, что условие

$$\sum_{n_i=1}^{\infty} \prod_{l=0}^{n_i-1} \frac{\lambda \varepsilon_i(l)}{\mu_i + v_i} < \infty \quad (11)$$

является необходимым и достаточным для существования стационарного распределения, а значит, необходимым для эргодичности процесса размножения и гибели  $\tilde{n}_i(t)$ . Для доказательства достаточности этого условия для эргодичности остаётся показать, что при выполнении (11) процесс  $\tilde{n}_i(t)$  является регулярным. Из сходимости ряда в (11) следует, что его общий член  $\prod_{l=0}^{n_i-1} \frac{\lambda \varepsilon_i(l)}{\mu_i + v_i}$  стремится к нулю при  $n_i \rightarrow \infty$ . Но тогда  $\prod_{l=1}^{n_i} \frac{\mu_i + v_i}{\lambda \varepsilon_i(l)} \rightarrow \infty$ , т. е. ряд  $\sum_{n_i=1}^{\infty} \prod_{l=1}^{n_i} \frac{\mu_i + v_i}{\lambda \varepsilon_i(l)}$  расходится к  $+\infty$ , что является достаточным условием регулярности процесса размножения и гибели.

Итак, для эргодичности процесса  $\tilde{n}_i(t)$ , описывающего изолированную станцию необходимо и достаточно выполнения (11). При этом эргодическое распределение определяется соотношениями (9), (10) и удовлетворяет равенствам (6).

#### 4. О стационарном распределении в форме произведения.

Докажем, что вероятности

$$p(n) = p_1(n_1)p_2(n_2)\dots p_N(n_N) \quad (12)$$

с множителями, определенными с помощью (6), удовлетворяют уравнениям локального равновесия (4). Прежде всего отметим, что из (6), (12) следует, что

$$\frac{p_i(n_i)}{p_i(n_i-1)} = \frac{\lambda \varepsilon_i(n_i-1)}{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}},$$

$$\frac{p(n-e_i)}{p(n)} = \frac{p_i(n_i-1)}{p_i(n_i)} = \frac{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\lambda \varepsilon_i(n_i-1)} \mathbf{I}_{\{n_i \neq 0\}}, \quad (13)$$

$$\frac{p(n+e_i)}{p(n)} = \frac{p_i(n_i+1)}{p_i(n_i)} = \frac{\lambda \varepsilon_i(n_i)}{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 0\}}}, \quad (14)$$

$$\frac{p(n+e_j-e_i)}{p(n)} = \frac{p_j(n_j+1)}{p_j(n_j)} \frac{p_i(n_i-1)}{p_i(n_i)} = \frac{\varepsilon_j(n_j)}{\varepsilon_i(n_i-1)} \frac{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\mu_j + \nu_j \mathbf{I}_{\{n_j \neq 0\}}} \mathbf{I}_{\{n_i \neq 0\}}. \quad (15)$$

Разделив (4) на  $p(n)$ , подставляя в полученное равенство (14) и используя (2), получим:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda \varepsilon_i(n_i) \frac{\mu_i p_{i0} + \nu_i r_{i0} \mathbf{I}_{\{n_i \neq 0\}}}{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 0\}}} = \lambda \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(n_i) s_{i0}(n_i-1) = \lambda,$$

т. е. (4) выполняется. Проверим выполнение (5). Если  $n_i = 0$ , то (5), очевидно, превращается в тождество  $0 = 0$ . Если же  $n_i \neq 0$ , то разделив (5) на  $p(n)$ , подставляя в полученное равенство (13), (15) и используя уравнение трафика (1), получим:

$$\begin{aligned} \mu_i(1-p_{ii}) + \nu_i(1-r_{ii}) \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}} &= \frac{p(n-e_i)}{p(n)} \lambda p_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{p(n+e_j-e_i)}{p(n)} (\mu_j p_{ji} + \nu_j r_{ji} \mathbf{I}_{\{n_j \neq 0\}}) = \\ &= \frac{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\lambda \varepsilon_i(n_i-1)} \lambda p_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\lambda \varepsilon_j(n_j)}{\mu_j + \nu_j \mathbf{I}_{\{n_j \neq 0\}}} \frac{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\lambda \varepsilon_i(n_i-1)} (\mu_j p_{ji} + \nu_j r_{ji} \mathbf{I}_{\{n_j \neq 0\}}) = \\ &= \frac{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\varepsilon_i(n_i-1)} \left[ p_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \varepsilon_j(n_j) \frac{\mu_j p_{ji} + \nu_j r_{ji} \mathbf{I}_{\{n_j \neq 0\}}}{\mu_j + \nu_j \mathbf{I}_{\{n_j \neq 0\}}} \right] = \frac{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\varepsilon_i(n_i-1)} \left[ p_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \varepsilon_j(n_j) s_{ji}(n_j-1) \right] = \\ &= \frac{\varepsilon_i(n_i)}{\varepsilon_i(n_i-1)} (\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}) (1 - s_{ii}(n_i-1)) = \frac{\varepsilon_i(n_i)}{\varepsilon_i(n_i-1)} (\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}) \left( 1 - \frac{\mu_i p_{ii} + \nu_i r_{ii} \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}}{\mu_i + \nu_i \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}} \right) = \\ &= \frac{\varepsilon_i(n_i)}{\varepsilon_i(n_i-1)} (\mu_i(1-p_{ii}) + \nu_i(1-r_{ii}) \mathbf{I}_{\{n_i \neq 1\}}), \end{aligned}$$

т. е. (4) выполняется тогда и только тогда, когда  $\varepsilon_i(n_i) = \varepsilon_i(n_i-1)$ , т. е. когда  $\varepsilon_i(n_i)$  не зависит от  $n_i$ . Таким образом, не существует стационарного распределения состояний сети в форме произведения множителей, зависящих от состояний отдельных станций.

К сожалению, если для удовлетворения нулевого уравнения локального равновесия взять (1), то для удовлетворения уравнений локального равновесия для узлов придётся брать другое уравнение трафика, которое совпадает с (1), в котором в левой части надо взять  $\varepsilon_j(n_j-1)$  вместо  $\varepsilon_j(n_j)$ .

**Заключение.** В настоящей работе исследовались сети с однолинейными станциями, что ограничивает возможность применения полученных результатов. Отметим, что возможность варьирования матрицами маршрутизации обслуженных и не дождавшихся обслуживания требований позволяет учитывать самые разнообразные практические ситуации и снижать необходимым образом нагрузку в «узких местах» исследуемых сетей. А это очень важно при проектировании новых и модернизации уже существующих информационно-вычислительных сетей.

### Литература

1. Якубович, О. В. Стационарное распределение сети массового обслуживания с различными типами сигналов и положительных заявок и ограничением на время пребывания / О. В. Якубович // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2008. – № 5 (50). – Ч. 2. – С. 207–211.
2. Якубович, О. В. Сеть массового обслуживания со случайным временем пребывания положительных, отрицательных заявок и сигналов / О. В. Якубович, В. Е. Евдокимович // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. – № 4 (5). – С. 63–67.
3. Летунович, Ю. Е. Неоднородные сети с ограничением на время пребывания в режимах обслуживания / Ю. Е. Летунович // АВТ. – 2010. – № 5. – С. 33–41.
4. Якубович, О. В. Многорежимная сеть массового обслуживания со случайным временем пребывания различных типов отрицательных заявок / О. В. Якубович, Ю. Е. Дудовская // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 4 (137). – С. 74–77.
5. Малинковский, Ю. В. Сети массового обслуживания с симметричными резервными каналами / Ю. В. Малинковский // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1986. – № 4. – С. 69–77.
6. Ковалев, Е. А. Сети массового обслуживания с резервными приборами / Е. А. Ковалев, Ю. В. Малинковский // АВТ. – 1987. – № 2. – С. 64–70.
7. Малинковский, Ю. В. Сети массового обслуживания с конечным числом потоков отрицательных заявок и с ограниченным временем пребывания / Ю. В. Малинковский, Н. Н. Бородин // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 1 (34). – С. 64–68.

Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 31.10.2023

## Векторные декартовы пучки Куммера-Гаусса. I. Однородная поляризация. Энергетические свойства

С.С. ГИРГЕЛЬ

Предложены и исследуются аналитические выражения в замкнутой форме для векторных декартовых 3D световых пучков Куммера-Гаусса с однородной поляризацией. Сформулированы ограничения на свободные параметры, чтобы такие пучки Куммера-Гаусса перенесли конечную мощность. Вычислены и графически исследуются потоки энергии таких пучков.

**Ключевые слова:** параксиальные пучки, векторные декартовы пучки, пучки Куммера-Гаусса, потоки энергии.

The analytical expressions in the closed form for vector cartesian 3D light of Kummer-Gauss beams from a uniform polarization are offered and investigated. Restrictions on free parameters that such of Kummer-Gauss beams transferred final power are formulated. Streams of energy of such beams are calculated and graphically investigated.

**Keywords:** paraxial beams, vector cartesian beams, Kummer-Gauss beams, streams of energy.

**Введение.** В работах [1]–[3] изучались скалярные параксиальные декартовы пучки Куммера-Гаусса (К-Г), затем в [4], [5] – скалярные декартовы астигматические и децентрированные пучки К-Г с однородной и неоднородной по сечению пучка поляризацией (энергетические и поляризационные свойства). В настоящей работе обсуждаются энергетические и поляризационные свойства векторных параксиальных декартовых астигматических пучков К-Г с однородной и неоднородной поляризациями. Получены явные выражения для векторов поляризации векторных декартовых астигматических параксиальных световых пучков К-Г. Исследованы поляризационные свойства, продольные и поперечные потоки энергии таких световых пучков.

**1. Скалярные астигматические пучки Куммера-Гаусса.** Прежде чем перейти к рассмотрению векторных пучков К-Г, предварительно необходимо изложить необходимую информацию о скалярных пучках К-Г. В работах [4]–[5] было представлено общее решение безразмерного параболического уравнения

$$(\partial_{X,X}^2 + \partial_{Y,Y}^2 + 4i\partial_Z)f = 0 \quad (1.1)$$

для амплитуды  $f(X, Y, Z)$  трехмерного скалярного астигматического пучка К-Г в форме

$$f(X, Y, Z) = G(X, Y, Z) \cdot h_1(X_1) \cdot h_2(Y_1) \cdot h_3(Z). \quad (1.2)$$

Здесь безразмерные переменные  $X = x/x_0$ ,  $Y = y/x_0$ ,  $Z = z/z_0$ , астигматический гауссиан

$G(X, Y, Z) \equiv G = \sqrt{\frac{Q_{0X}Q_{0Y}}{Q_X Q_Y}} \exp\left(i\left(\frac{X^2}{Q_X} + \frac{Y^2}{Q_Y}\right)\right)$ . Согласующая функция  $h_3(Z) = \left(\frac{Q_{0X}P_X}{P_{0X}Q_X}\right)^{\frac{v_1}{2}} \left(\frac{Q_{0Y}P_Y}{P_{0Y}Q_Y}\right)^{\frac{v_2}{2}}$ . Но-

вые переменные  $X_1$ ,  $Y_1$  выражаются через старые  $(X, Y)$ , как  $X_1^2 = t_X X^2$ ,  $Y_1^2 = t_Y Y^2$ , где зависящие только от  $Z$  множители  $t_X = i(1/P_X - 1/Q_X)$ ,  $t_Y = i(1/P_Y - 1/Q_Y)$ . Для краткости введены четыре безразмерных комплексных параметра пучка  $Q_{X,Y} = Z - Q_{0X,0Y}$  и  $P_{X,Y} = Z - P_{0X,0Y}$ , где свободные комплексные константы  $Q_{0X,0Y} = Q'_{0X,0Y} + iQ''_{0X,0Y}$ ;  $P_{0X,0Y} = P'_{0X,0Y} + iP''_{0X,0Y}$ .

Амплитуды  $h_1(X_1)$  и  $h_2(Y_1)$  в плоскостях  $(X, Z)$  и  $(Y, Z)$  3D пучка К-Г выражаются через функции Куммера  $M$  следующим образом:

$$h_1(X_1) = A_1 \cdot X_1 \cdot M\left(\frac{1}{2} - \frac{\nu_1}{2}, \frac{3}{2}, X_1^2\right) + B_1 \cdot M\left(-\frac{\nu_1}{2}, \frac{1}{2}, X_1^2\right) \equiv h_{1o} + h_{1e}; \quad (1.3)$$

$$h_2(Y_1) = A_2 \cdot Y_1 \cdot M\left(\frac{1}{2} - \frac{\nu_2}{2}, \frac{3}{2}, Y_1^2\right) + B_2 \cdot M\left(-\frac{\nu_2}{2}, \frac{1}{2}, Y_1^2\right) \equiv h_{2o} + h_{2e}, \quad (1.4)$$

где  $A_1, B_1, A_2, B_2$  – некоторые произвольные константы. Пометки  $o$  и  $e$  здесь и далее указывают соответственно на четность (*even*) и нечетность (*odd*) функций  $h_e$  и  $h_o$  относительно изменения знаков их аргументов.

Так как существуют четные и нечетные функции  $h_1$  и  $h_2$ , то по четности все решения (1.2) уравнения (1.1) делятся на четыре типа:

$$f_{ee} = Gh_{1e}h_{2e}h_3, f_{oe} = Gh_{1o}h_{2e}h_3, f_{eo} = Gh_{1o}h_{2e}h_3, f_{oo} = Gh_{1o}h_{2o}h_3. \quad (1.5)$$

Кратко эти решения для амплитуд скалярных парааксиальных астигматических 3D пучков К-Г можно записать, как  $f_{jk} = Gh_{1j}h_{2k}h_3$ , где индексы (j, k) принимают два значения (o, e). Функции  $f_{jk}$  зависят от трех переменных ( $X, Y, Z$ ) и шести ( $\nu_1, \nu_2, Q_{0X}, Q_{0Y}, P_{0X}, P_{0Y}$ ) свободных комплексных параметров. Они описывают шестипараметрическое семейство решений для амплитуд скалярных парааксиальных астигматических 3D пучков К-Г.

Для физически реализуемых пучков конечной мощности должна выполняться квадратичная интегрируемость (КИ) функций  $f$ . Для обсуждаемых пучков с простым астигматизмом условия КИ должны выполняться для каждой из плоскостей ( $X, Z$ ) и ( $Y, Z$ ) сечения пучка. В таблице 1 представлены, следуя [4], достаточные условия КИ скалярных 2D пучков К-Г в определенной плоскости, например, ( $X, Z$ ). Во всех случаях децентровка пучка может только ухудшить условия КИ. Поэтому здесь исключены варианты, содержащие условия типа  $Q_0'' = 0$  и  $P_0'' = 0$ , поскольку тогда условия КИ могут выполняться только для центрированных (несмещенных) пучков. Интересно, что во всех случаях мнимая часть  $\nu''$  комплексного параметра  $\nu = \nu' + i\nu''$  не влияет на выполнение условий КИ.

Таблица 1 – Условия КИ для 2D световых пучков К-Г с непрерывным свободным параметром  $\nu = \nu' + i\nu''$

№	Ограничения на параметры $Q_0''$	Ограничения на параметры $P_0''$	Ограничения на индекс $\nu = \nu' + i\nu''$ . $\mathbb{N} = 1, 2, \dots$	Предел $ f $ при $ x  \rightarrow \infty$	Выполнение условий КИ
1	$Q_0'' > 0$	$P_0'' > 0$	нет	$ f_e  \rightarrow 0;  f_o  \rightarrow 0$	да
2	$Q_0'' > 0$	$P_0'' \leq 0$	$\nu = 2\mathbb{N} - 2$	$ f_e  \rightarrow 0;  f_o  \rightarrow \infty$	только для $Gf_e$
3	$Q_0'' > 0$	$P_0'' \leq 0$	$\nu = 2\mathbb{N} - 1$	$ f_o  \rightarrow 0;  f_e  \rightarrow \infty$	только для $Gf_o$
4	$Q_0'' \leq 0$	$P_0'' > 0$	$\nu = -2\mathbb{N}$	$ f_o  \rightarrow 0;  f_e  \rightarrow \infty$	только для $Gf_o$
5	$Q_0'' \leq 0$	$P_0'' > 0$	$\nu = -2\mathbb{N} + 1$	$ f_e  \rightarrow 0;  f_o  \rightarrow \infty$	только для $Gf_e$
6	$Q_0'' > 0$	$ P_0''  \rightarrow \infty$	$\nu' > -1/2$	$ f  \rightarrow 0$	да
7	$Q_0'' > 0$	$ P_0''  \rightarrow \infty$	$\nu' = -1$	$ f  \rightarrow \text{const}$	нет
8	$Q_0'' > 0$	$ P_0''  \rightarrow \infty$	$\nu' \in (-1; -1/2]$	$ f  \rightarrow 0$	нет
9	$ Q_0''  \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' < -1/2$	$ f  \rightarrow 0$	да
10	$ Q_0''  \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' \in [-1/2; 0)$	$ f  \rightarrow 0$	нет
11	$ Q_0''  \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' = 0$	$ f  \rightarrow \text{const}$	нет

## 2. Векторные астигматические световые пучки К-Г с однородной поляризацией.

Перейдем теперь от скалярных к векторным пучкам К-Г с однородной поляризацией. Следуя разработанному нами формализму [4]–[5], векторы электрического и магнитного полей векторных парааксиальных декартовых пучков К-Г с однородной поляризацией запишем, как  $\mathbf{E} = \mathbf{e}_\perp f + \theta \nabla \mathbf{e}_\perp f \cdot \mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{H} = n[\mathbf{e}_z, \mathbf{e}_\perp] f$ . Здесь безразмерный параметр парааксиальности

пучка  $\theta = 1/kx_0 \ll 10^{-4}$ . Заданный комплексный постоянный вектор поляризации  $\mathbf{e}_\perp = \eta_x \mathbf{e}_x + \eta_y \mathbf{e}_y$  однозначно определяет поляризационные характеристики пучка. Поперечные компоненты вектора  $\mathbf{E}$  равны:  $E_x = \eta_x f$ ;  $E_y = \eta_y f$ . Введем комплексный параметр поляризации  $\eta = \eta_y / \eta_x = tg(\psi' + i\psi'')$ , тогда азимут световой волны равен  $\psi'$ , а ее эллиптичность  $\mathcal{Y}$  выражается как  $\gamma = th\psi''$  [6]. Продольная составляющая  $E_z$  электрического поля пучка выражается через вектор  $\mathbf{a} = \nabla f / f$ , как  $E_z = i\theta(E_x a_x + E_y a_y) = i\theta(\eta_x a_x + \eta_y a_y)f = i\theta \mathbf{e}_\perp \mathbf{a}_\perp f$ . Каждому из четырех типов скалярных пучков К-Г, описываемых функциями  $f_{jk}$ , соответствует некоторый пучок К-Г с вектором однородной поляризации  $\mathbf{E}_{jk}$ . Поперечные компоненты вектора  $\mathbf{a}$ :  $a_{kx} = \partial_x f_{jk} / f_{jk}$ ;  $a_{ky} = \partial_y f_{jk} / f_{jk}$ .

Перейдем к энергетическим характеристикам векторных декартовых пучков К-Г. Усредненные по времени плотности энергии  $\mathcal{W}$ , продольного  $S_z$  и поперечного  $\mathbf{S}_\perp$  потоков энергии электромагнитного поля для парааксиальных векторных пучков К-Г с однородной поляризацией можно представить как [2]:

$$w = \frac{\varepsilon |f|^2}{8\pi}; \quad S_z = \frac{c}{n} w; \quad \mathbf{S}_\perp = \mathbf{S}_o + \mathbf{S}_s; \quad \mathbf{S}_o = \theta S_z \cdot \text{Im}(\mathbf{e}_x a_x + \mathbf{e}_y a_y);$$

$$\mathbf{S}_s = \theta S_z \cdot th2\psi'' \cdot \text{Re}(\mathbf{e}_x a_y - \mathbf{e}_y a_x). \quad (2)$$

В выражении для  $\mathbf{S}_\perp$  выделены явно, следуя формализму [7]–[8], плотность орбитального  $\mathbf{S}_o$  и спинового  $\mathbf{S}_s$  потоков энергии.

Вычисляя X-компоненты векторов  $\mathbf{a}$ , получаем  $a_{ex} = \frac{2iX}{Q_x} - \frac{2t_1 v_1 X \cdot M(1 - v_1/2, 3/2; t_1 X^2)}{M(-v_1/2, 1/2; t_1 X^2)}$ ;

$$a_{ox} = \frac{1}{X} + \frac{2iX}{Q_x} + \frac{2t_x(v_1 - 1)X \cdot M((3 - v_1)/2, 5/2; t_1 X^2)}{3Q_x M((1 - v_1)/2, 3/2; t_1 X^2)}$$
 и аналогичные выражения для  $a_{ey}$  и  $a_{oy}$ .

Здесь использованы известные [9] преобразования Куммера  $\partial_u M(a, b, u) = \frac{a}{b} M(a + 1, b + 1, u)$ .

Чтобы векторные пучки К-Г с однородной поляризацией переносили конечную мощность, необходимо, чтобы для функций  $f$  выполнялись условия её КИ. Выше нами были представлены условия КИ для скалярных 2D пучков К-Г. Эти ограничения на свободные параметры пучка, как показывает анализ, справедливы также и для векторных 3D пучков К-Г с однородной поляризацией.

Так как поляризация исследуемых векторных пучков К-Г однородная и она задается предварительно, то перейдем к графическому исследованию свойств энергетических потоков пучков. Продольный поток энергии  $S_z$  определяет интенсивность  $I$  пучка. Поперечные потоки энергии вследствие парааксиального характера рассматриваемых полей значительно меньше продольных, однако часто очень важны в приложениях и ими нельзя пренебречь. Как отмечалось выше, возможны четыре различных типа пучков. На рисунках 2.1–2.3 показаны интенсивность и линии орбитального- $\mathbf{S}_o$ , спинового- $\mathbf{S}_s$  и общего  $\mathbf{S}_\perp$  потоков энергии для  $E_{ee}$ ,  $E_{eo}$ ,  $E_{oo}$  мод векторных декартовых пучков К-Г с однородной поляризацией. Как видим, число пиков интенсивности может изменяться от одного до нескольких. Все картины интенсивности и поперечных потоков энергии обладают двумя XZ и YZ плоскостями симметрии. Поэтому общая точечная группа симметрии  $2_z m_x m_y$  у всех рисунков одинакова. Это обусловлено тем, что исходные функции  $h_1$  и  $h_2$  являются четными или нечетными относительно изменения знаков их аргументов. На рисунках 2.1–2.3 выбраны одинаковые значения свободных параметров, чтобы можно было проследить влияние четности или нечетности функций  $h_1$  и  $h_2$  на характеристики картин. По условиям КИ эти изображения соответ-

вуют варианту № 1 таблицы 1. Как видим, картины интенсивностей и поперечных потоков энергии могут быть самыми разнообразными. Как известно [10], для простейших векторных однородно поляризованных пучков Гаусса спиновые потоки энергии представляют собой концентрические окружности, а орбитальные – радиальные линии. Для ТЕ и ТМ мод Гаусса орбитальные потоки энергии снова направлены вдоль поперечных радиусов, а спиновые потоки энергии отсутствуют! Однако для мод К-Г кривые поперечных потоков энергии очень сложные. Переходы  $E_{ee} - E_{eo} - E_{oo}$  также значительно изменяют соответствующие картины.

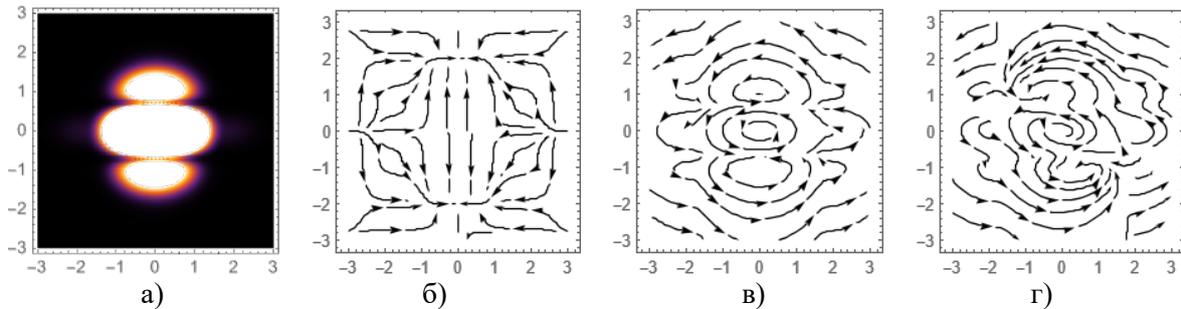


Рисунок 2.1 – Интенсивность  $I$  и линии поперечных потоков энергии  $E_{ee}$ -мод векторных декартовых пучков К-Г: а) интенсивность  $I$ ; б) линии орбитального  $S_o$  потока энергии; в) линии спинового  $S_s$  потока энергии; г) линии общего  $S_{\perp}$  потока энергии. Используемые параметры:  $Z = 0.1$ ;  $P''_{ox} = 1$ ;  $P'_{ox} = 0$ ;  $P'_{oy} = 0$ ;  $P''_{oy} = 0.5$ ;  $Q''_{ox} = 3$ ;  $Q''_{oy} = 2$ ;  $Q'_{oy} = 0$ ;  $Q'_{ox} = 0$ ;  $v''_1 = -0.2$ ;  $v''_2 = 0.1$ ;  $v'_1 = -1$ ;  $v'_2 = -2.2$ ;  $v''_2 = -0.1$

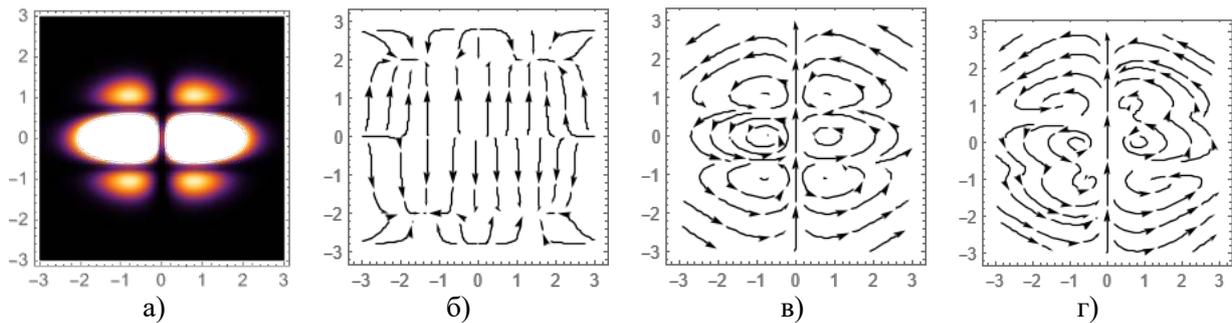


Рисунок 2.2 – Интенсивность  $I$  и линии поперечных потоков энергии  $E_{eo}$ -мод векторных декартовых пучков К-Г: а) интенсивность  $I$ ; б) линии орбитального  $S_o$  потока энергии; в) линии спинового  $S_s$  потока энергии; г) линии общего  $S_{\perp}$  потока энергии. Используемые параметры, как на Рисунке 2.1

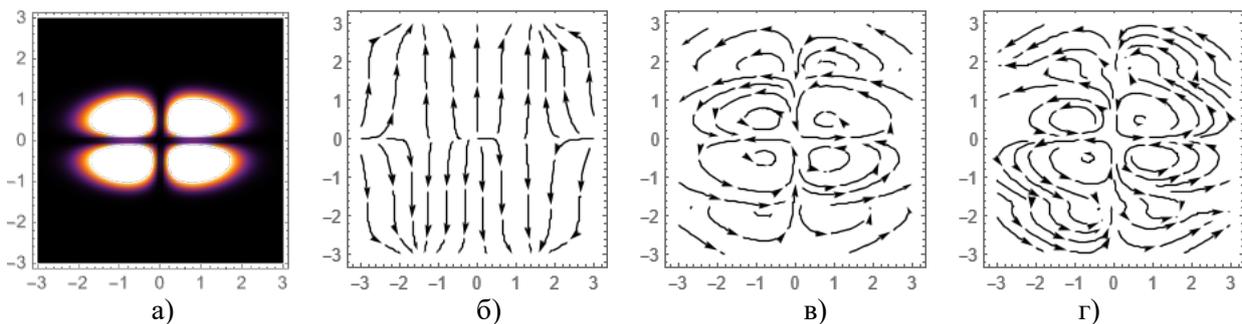


Рисунок 2.3 – Интенсивность  $I$  и линии поперечных потоков энергии  $E_{oo}$ -мод векторных декартовых пучков К-Г: а) интенсивность  $I$ ; б) линии орбитального  $S_o$  потока энергии; в) линии спинового  $S_s$  потока энергии. г) линии общего  $S_{\perp}$  потока энергии. Используемые параметры, как на Рисунке 2.1.

На рисунке 2.4 значение  $Q''_{ox} < 0$  и используется функция  $h_{10}$ , поэтому для выполнения условий КИ выбран вариант № 4 таблицы 1. Так как здесь  $P''_{oy} < 0$  и используется функция

$h_{2e}$ , то выбирались ограничения на параметры, соответствующие варианту № 4 таблицы 1. Аналогичные результаты по условиям КИ будут также наблюдаться для Еео-мод (варианты № 3 и № 5 таблицы 1).

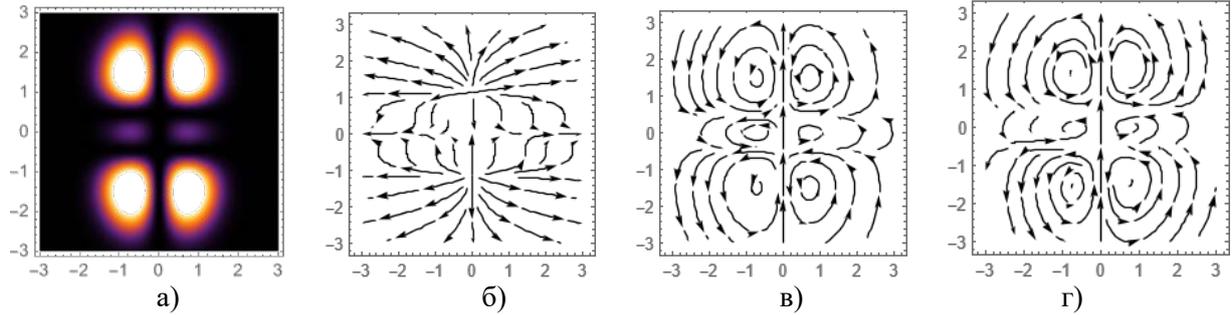


Рисунок 2.4 – Интенсивность  $I$  и линии поперечных потоков энергии Еое-мод векторных декартовых пучков К-Г: а) интенсивность  $I$ ; б) линии орбитального  $S_o$  потока энергии; в) линии спинового  $S_s$  потока энергии; г) линии общего  $S_{\perp}$  потока энергии. Используемые параметры:  $Z=0.1$ ;  $P''_{ox}=1$ ;  $P'_{ox}=0$ ;  $P'_{oy}=0$ ;  $P''_{oy}=-0.5$ ;  $Q''_{ox}=-1$ ;  $Q''_{oy}=2$ ;  $Q'_{oy}=0$ ;  $Q'_{ox}=0$ ;  $v''_1=0$ ;  $v'_1=-2$ ;  $v'_2=2$ ;  $v''_2=0$ .

Рисунок 2.5 соответствует варианту № 9 таблицы 1. Аналогичные результаты по условиям КИ будут также наблюдаться для варианта №6 таблицы 1. Вариант № 6 эквивалентен № 9 после замен  $P \leftrightarrow Q$ . Хотя на рисунке 2.5 построены графики для Еоо-мод, условия КИ и те же самые параметры пригодны также для остальных трех типов мод.

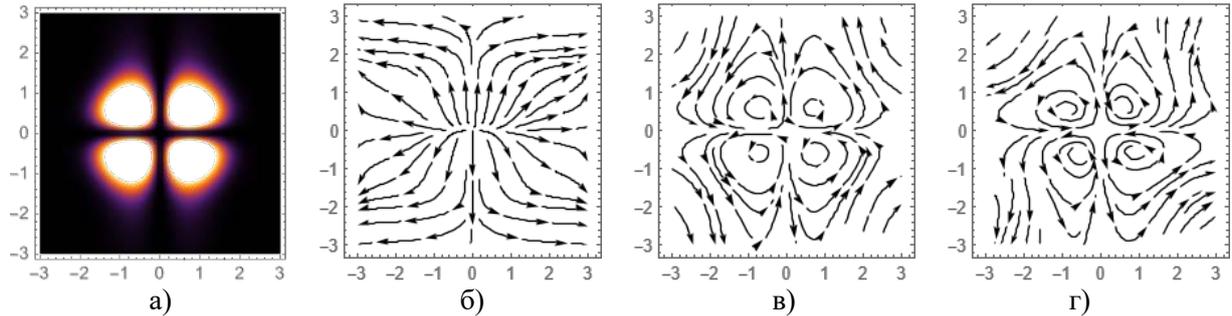


Рисунок 2.5 – Интенсивность  $I$  и линии поперечных потоков энергии Еоо-мод векторных декартовых пучков: а) интенсивность  $I$ ; б) линии орбитального  $S_o$  потока энергии; в) линии спинового  $S_s$  потока энергии; г) линии общего  $S_{\perp}$  потока энергии. Используемые параметры:  $Z=0.1$ ;  $P''_{ox}=1$ ;  $P'_{ox}=0$ ;  $P'_{oy}=0$ ;  $P''_{oy}=0.5$ ;  $Q''_{ox} \rightarrow \infty$ ;  $Q''_{oy} \rightarrow \infty$ ;  $Q'_{oy}=0$ ;  $Q'_{ox}=0$ ;  $v''_1=-0.2$ ;  $v''_1=0.1$ ;  $v'_1=-2$ ;  $v'_2=-1.5$ ;  $v''_2=0.2$ .

Коснемся теперь вопроса о влиянии различных свободных параметров на свойства изображений. Возрастание продольного расстояния  $Z$  приводит, как известно, к поперечному расплыванию картин. Варьирование остальных комплексных свободных параметров сложным образом влияет на возможные изменения соответствующих картин. Даже мнимые части  $v''_1$ ,  $v''_2$  свободных параметров  $v_1$ ,  $v_2$  могут количественно и качественно влиять на картины, хотя не изменяют условий физической реализуемости пучков.

**Заключение.** В данной работе выведены выражения, описывающие практически не изучавшиеся типы пучков – векторные параксиальные астигматические декартовы световые пучки К-Г с однородной поляризацией. Они характеризуются шестью свободными непрерывными комплексными параметрами ( $v_1$ ,  $v_2$ ,  $Q_{ox}$ ,  $Q_{oy}$ ,  $P_{ox}$ ,  $P_{oy}$ ). Приведен формализм для вычисления поляризационных характеристик таких пучков. Сформулированы условия физической реализуемости однородно поляризованных декартовых векторных пучков К-Г с переносимой конечной мощностью во всем пространстве. Существенно, что условия КИ пригодны для не-

прерывных комплексных значений свободных параметров  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . Вычислены явные выражения для плотностей продольного и поперечного потоков энергии для исследуемых пучков К-Г. Выполнено графическое моделирование их поперечных потоков энергии и интенсивности. Проведен соответствующий анализ. Установлено, что выбор различных свободных параметров пучка приводит к качественно различным физическим картинам.

### Литература

1. Bandres, M. A. Cartesian beams / M. A. Bandres, J. C. Gutierrez-Vega // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32, № 23. – P. 3459–3461.
2. Гиргель, С. С. Скалярные параксиальные двумерные гауссовоподобные световые пучки / С. С. Гиргель // *Проблемы, физики, математики и техники*. – 2010. – № 1 (2). – С. 7–11.
3. Гиргель, С. С. Скалярные астигматические 3D световые пучки Куммера-Гаусса / С. С. Гиргель // *Проблемы, физики, математики и техники*. – 2013. – № 1 (14). – С. 19–23.
4. Гиргель, С. С. Децентрированные пучки Куммера-Гаусса / С. С. Гиргель // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2015. – № 6 (93). – С. 112–116.
5. Гиргель, С. С. Поляризационные и энергетические свойства векторных гауссовоподобных пучков. I. Однородная поляризация / С. С. Гиргель // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2016. – № 1 (26). – С. 17–21.
6. Гиргель, С. С. Энергетические характеристики векторных декартовых пучков Куммера с переносимой конечной мощностью / С. С. Гиргель // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2022. – № 3 (52). – С. 13–17.
7. Berry, M. V. Optical currents / M. V. Berry // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11 (9). – P. 094001.
8. Bekshaev, A. Internal flows and energy circulation in light beams / A. Bekshaev, K. Bliokh, M. Soskin // *Journal of Optics* – 2011. – Vol. 13 (5). – P. 053001.
9. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 830 с.
10. Гиргель, С. С. Поляризационные и энергетические свойства векторных параксиальных гауссовых световых пучков / С. С. Гиргель // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2012. – № 3 (12). – С. 19–24.

## Application of reduced variables in problems of analytical thermodynamics

E.A. DEY, G.YU. TYUMENKOV

The article shows, using specific examples, that analytical expressions of equations of state, thermodynamic relations and coefficients, process parameters can be written in terms of the reduced variables. In this case, analogues of thermodynamic parameters used in practice are obtained, which are dimensionless and applicable for all real gases described by a specific equation of state.

**Keywords:** equation of state, critical parameters, reduced variables, Joule-Thomson effect, inversion curve, thermodynamic coefficients.

В статье на конкретных примерах показано, что аналитические выражения уравнений состояния, термодинамических соотношений и коэффициентов, параметров процессов могут быть записаны в терминах приведенных переменных. При этом получаются аналоги используемых на практике термодинамических величин, являющиеся безразмерными и применимыми для всех реальных газов, описываемых конкретным уравнением состояния.

**Ключевые слова:** уравнение состояния, критические параметры, приведенные переменные, эффект Джоуля-Томсона, кривая инверсии, термодинамические коэффициенты.

**Introduction.** Theoretical and numerical studies of the real gases properties have significant practical importance for a variety of engineering and scientific applications. And the basis for these studies is the equations of state for real gases [1]–[9].

One of the elements of comparing the equations of state with experimental data is the consideration of the critical state of a substance, at which the differences in the physical properties of liquid and vapor disappear. On the isotherm graph at a critical temperature, this state corresponds to a single (critical) point, which is the inflection point of the isotherm. Mathematically, this means fulfilling the conditions

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T_{CR}} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T_{CR}} = 0. \quad (1)$$

Relations (1) form a system of equations, the solution of which allows us to express the characteristics of the critical state (critical temperature  $T_{CR}$ , critical pressure  $P_{CR}$  and critical volume  $V_{CR}$ ) using the parameters of the equation of state. In many cases, it is convenient to use critical parameters as a unit of measurement of thermodynamic quantities. This means a transition in relationships to reduced, or relative dimensionless variables

$$\tilde{V} = \frac{V}{V_{CR}}, \quad \tilde{T} = \frac{T}{T_{CR}}, \quad \tilde{P} = \frac{P}{P_{CR}}. \quad (2)$$

These variables give the following reduced form of the van der Waals equation [1]

$$\tilde{P} = \frac{8\tilde{T}}{3\tilde{V} - 1} - \frac{3}{\tilde{V}^2}. \quad (3)$$

In the reduced equation of state there are no parameters  $a$ ,  $b$ , which describe the properties of specific gases. Such an equation describes at once all substances for which the van der Waals equation is valid.

On this basis, the concept of corresponding states (states with the same values of the reduced variables) was introduced for various substances and the law of corresponding states was formulated [1]–[3]: if different gases have the same values for two out of three reduced variables, then the values of the third reduced variable coincide. This makes it possible to obtain results that are common to all substances in thermodynamically similar states, and to study the properties of some gas if the properties of another gas are known. The use of the reduced variables is very convenient, since they give results that are not related to a specific substance, but rather characterize a specific equation of state. This form of writing equations of state uses only dimensionless variables, constant fac-

tors, and functions that depend on dimensionless variables. Another advantage of using reduced (dimensionless) variables is the rare possibility of comparing experimental results expressed in different units of measurement used in the technical literature.

In papers [10]–[14], in the framework of the development of the principle of corresponding states, reduced analogues of various thermodynamic quantities were introduced and their numerical and graphical study was carried out for various equations of state for real gases.

In this paper we provide the review of some problems solved using the reduced variables in the analytical thermodynamics of real gases and the results obtained.

**Examples of reduced equations of state for real gases.** In this part of the review we will give four examples of reduced equations of state that are currently generally accepted and widely used.

**1. Redlich-Kwong equation of state.** One of the best versions of the equation of state for real gases up to the present day remains the Redlich-Kwong equation [4], in which the dependence of the term taking into account intermolecular repulsion on temperature was written as  $1/\sqrt{T}$ . The molar form of the equation and its critical parameters are

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{TV}(V+b)}; \quad (4)$$

$$V_{CR} = \frac{b}{\xi}, \quad T_{CR} = \left( \frac{3a\xi^2}{bR} \right)^{2/3}, \quad P_{CR} = \left( \frac{Ra^2\xi^7}{3b^5} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

In formula (5) a constant  $\xi = \sqrt[3]{2} - 1 = 0,259921 \cong 0,260$  is introduced. It satisfies the condition  $1 - \xi = \xi(\xi + 1)(\xi + 2)$ . The reduced Redlich-Kwong equation of state has the form

$$\tilde{P} = \frac{3\tilde{T}}{\tilde{V} - \xi} - \frac{1}{\xi\tilde{T}^{1/2}\tilde{V}(\tilde{V} + \xi)}. \quad (6)$$

**2. Soave-Redlich-Kwong equation of state.** Understanding the structure of the Redlich-Kwong equation [4] as containing a temperature-dependent parameter led to the formulation of the Soave-Redlich-Kwong equation [5]

$$\left( P + \frac{a(\tilde{T})}{V(V+b)} \right) (V-b) = RT. \quad (7)$$

Here the dependencies on the reduced temperature and the acentric Pitzer factor  $\omega$  [5] are introduced into parameter  $a$  with the same critical parameters and  $\xi$

$$a(\tilde{T}) = a_{CR}\alpha(\tilde{T}); \quad a_{CR} = \frac{0,42748R^2T_{CR}^2}{P_{CR}}; \\ \alpha(\tilde{T}) = [1 - m(1 - \sqrt{\tilde{T}})]^2; \quad m = 0,480 + 1,574\omega - 0,175\omega^2. \quad (8)$$

Finally, in reduced form, the Soave-Redlich-Kwong equation looks like

$$\tilde{P} = \frac{3\tilde{T}}{\tilde{V} - \xi} - \frac{\alpha(\tilde{T})}{\xi\tilde{V}(\tilde{V} + \xi)}. \quad (9)$$

**3. Ishikawa-Chung-Lu equation of state.** The use of temperature-dependent parameters was further developed in [6], in which an equation with a new form of the «repulsive» term and two temperature-dependent parameters was proposed. For one mole of gas, this equation is written as

$$P = \frac{RT(2V + b(T))}{V(2V - b(T))} - \frac{a(T)}{\sqrt{TV}(V + b(T))}. \quad (10)$$

In (10) the parameters have the next structure

$$a(T) = \Omega_a \alpha(\tilde{T}) \frac{R^2 T_{CR}^{5/2}}{P_{CR}}, \quad b(T) = \Omega_b \beta(\tilde{T}) \frac{RT_{CR}}{P_{CR}}, \quad \alpha(1) = \beta(1) = 1. \quad (11)$$

The functions  $\alpha(\tilde{T})$ ,  $\beta(\tilde{T})$  in [6] were presented in the form of third-order polynomials in the reduced temperature, the coefficients of which for each substance were selected based on experimental data. In the reduced variables, the Ishikawa-Chang-Lu equation has the form [15]

$$\tilde{P} = \frac{\tilde{T}(2\chi\tilde{V} + \beta(\tilde{T}))}{\Omega_b\chi\tilde{V}(2\chi\tilde{V} - \beta(\tilde{T}))} - \frac{\Omega_a\alpha(\tilde{T})}{\Omega_b^2\sqrt{\tilde{T}}\chi\tilde{V}(\chi\tilde{V} + \beta(\tilde{T}))}, \quad (12)$$

where

$$\Omega_a = \frac{8(\chi+1)^3}{3(6\chi+1)^2} = 0,46712311; \quad \Omega_b = \frac{2}{6\chi+1} = 0,10876233; \quad \chi = 2,89812008. \quad (13)$$

**4. Fogel'son-Likhachev equation of state.** In paper [7], the molar equation of state for real gas was considered, which containing five parameters and having the meaning of a generalization of the van der Waals equation

$$\left( P + \frac{a}{(V+c)^k T^m} \right) (V-b) = RT. \quad (14)$$

Special cases of equation (14) are the next: van der Waals equation ( $c=0, k=2, m=0$ ), Berthelot equation ( $c=0, k=2, m=1$ ), Clausius equation ( $k=2, m=1$ ). Reduced form of equation (14) is

$$\left[ \tilde{P} + \frac{A}{(\tilde{V} + \tilde{c})^k \tilde{T}^m} \right] (\tilde{V} - \tilde{b}) = B\tilde{T}, \quad (15)$$

where following notations are used

$$A = \frac{(k+1)(1+\tilde{c})^k}{k-1}, \quad B = \frac{4k(1+\tilde{c})}{k^2-1}, \quad \tilde{b} = \frac{b}{V_{CR}}, \quad \tilde{c} = \frac{c}{V_{CR}}.$$

**Description of the Joule–Thomson effect in the reduced variables.** Numerous engineering applications are based on the use of a subsystem–equilibrium isenthalpic ( $dW=0$ ) process of pumping real gas through a porous partition [1]–[3]. During this process, a change in the temperature of the real gas is observed (Joule-Thomson effect). Mathematically, this change is characterized by the Joule-Thomson coefficient. In work [10] in determining this coefficient

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_w = -\tilde{\lambda} \frac{P_{CR}}{C_p} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (16)$$

a dimensionless quantity  $\tilde{\lambda}$  is highlighted, which we will call the reduced Joule-Thomson parameter, and which is expressed in terms of reduced variables

$$\lambda = P_{CR} \tilde{\lambda}; \quad \tilde{\lambda} = \tilde{V} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}} + \tilde{T} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}}. \quad (17)$$

This parameter has the same value for gases in the corresponding states. In the physical range  $\left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T < 0$ , and the isobaric heat capacity  $C_p > 0$ , it means that the signs of  $\mu_{JT}$  and  $\tilde{\lambda}$  in (16) are the

same. When pressure decreases ( $d\tilde{P} < 0$ ), which follows from the condition of the Joule-Thomson process, two options for changing the temperature are possible depending on the sign of the parameter:  $\tilde{\lambda} > 0 \rightarrow d\tilde{T} < 0$  or  $\tilde{\lambda} < 0 \rightarrow d\tilde{T} > 0$ . The first option corresponds to the positive Joule-Thomson effect (the gas cools down), the second – to the negative one (the gas heats up).

Therefore, to determine the sign of the Joule-Thomson effect, it is enough to know the sign of the reduced parameter  $\tilde{\lambda}$ . Accordingly, the reduced inversion temperature  $\tilde{T}_i$  can be obtained from condition  $\tilde{\lambda} = 0$ .

The reduced Joule-Thomson coefficient  $\tilde{\lambda}$  for the Redlich-Kwong equation was obtained in [10] in the form

$$\tilde{\lambda} = \frac{5\tilde{V} + 3\xi}{2\xi\tilde{T}^{1/2}\tilde{V}(\tilde{V} + \xi)^2} - \frac{3\xi\tilde{T}}{(\tilde{V} - \xi)^2}. \quad (18)$$

Then taking into account the condition  $\tilde{\lambda} = 0$ , we found expressions for the reduced inversion temperature and the reduced pressure at the inversion points through the reduced volume

$$\tilde{T}_i(\tilde{V}) = \left[ \frac{(5\tilde{V} + 3\xi)(\tilde{V} - \xi)^2}{6\xi^2\tilde{V}(\tilde{V} + \xi)^2} \right]^{2/3} \quad (19)$$

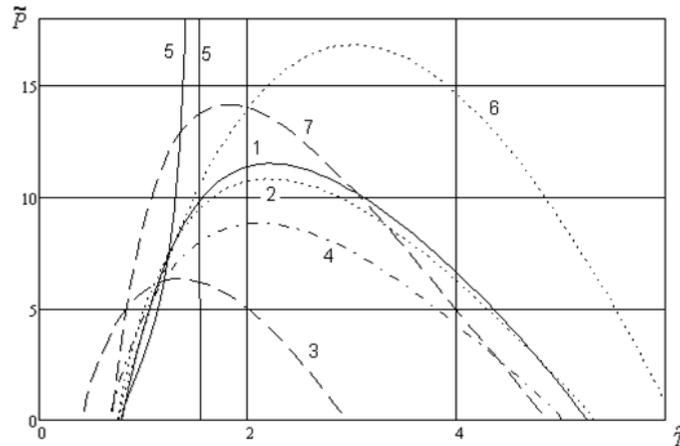
$$\tilde{P}_i(\tilde{V}) = \frac{3^{1/3}(5\tilde{V}^2 - 4\xi\tilde{V} - 5\xi^2)}{[4\xi^4\tilde{V}^2(5\tilde{V} + 3\xi)(\tilde{V} + \xi)^4(\tilde{V} - \xi)^2]^{1/3}}. \quad (20)$$

When considering the reduced Ishikawa-Chang-Lu equation, the reduced Joule-Thomson coefficient was obtained in paper [12] in the form (new parameter  $x = \chi\tilde{V}$ )

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda} = & \frac{3(6\chi + 1)}{(\chi + 1)^3} x(x + \beta(\tilde{T}))^2 \left[ \tilde{T}^2 \left( \frac{d\beta}{d\tilde{T}} \right) - \tilde{T}\beta(\tilde{T}) \right] + \\ & + (2x - \beta(\tilde{T}))^2 (x + \beta(\tilde{T})) \left[ \frac{3\alpha(\tilde{T})}{2\sqrt{\tilde{T}}} - \sqrt{\tilde{T}} \left( \frac{d\beta}{d\tilde{T}} \right) \right] + \\ & + (2x - \beta(\tilde{T}))^2 \left[ \sqrt{\tilde{T}} \alpha(\tilde{T}) \left( \frac{d\beta}{d\tilde{T}} \right) + \frac{x}{\sqrt{\tilde{T}}} \alpha(\tilde{T}) \right] = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Thus, at a fixed temperature, the condition  $\tilde{\lambda} = 0$  leads to a cubic equation in the parameter  $x$ .

Now we present the graphical results of the numerical analysis:



Picture 1 – Graphs of inversion curves at  $\omega = 0$ : 1 – based on the results of processing experimental data [15]; 2 – for the Redlich-Kwong equation; 3 – for the Soave-Redlich-Kwong equation; 4 – for the Peng-Robinson equation (additional one); 5, 6, 7 – for the Ishikawa-Chang-Lu equation with various parameters [12]

The theoretical inversion curves in the reduced variables were compared with the data of [15], in which a generalized experimental inversion curve in the reduced variables was constructed for substances with a small acentricity factor (argon, methane, nitrogen, oxygen, xenon, krypton, carbon monoxide) in the form:

$$\tilde{P} = \sum_{k=0}^6 \beta_k \tilde{T}^k. \quad (22)$$

In (22) generalized curve parameters are the following:  $\beta_0 = -32.5209374$ ,  $\beta_1 = 65.6922312$ ,  $\beta_2 = -39.738430$ ,  $\beta_3 = 12.9300299$ ,  $\beta_4 = -2.46176904$ ,  $\beta_5 = 0.25378553$ ,  $\beta_6 = -0.0109865$ .

Picture 1 shows the inversion curve plots obtained from various equations of state in reduced form. Each curve limits its area of positive effect from above. The best agreement with experiment is observed for the theoretical inversion curve obtained on the base of Redlich-Kwong equation.

**Reduced thermodynamic coefficients of real gases.** Thermodynamic (thermal) coefficients [2] characterize the thermal and elastic properties of substances. The mathematical definition of isobaric volume expansion coefficient, isochoric thermal pressure coefficient and isothermal compressibility has the form, respectively, [2]

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p; \quad \beta_v = \frac{1}{P} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v; \quad k_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T. \quad (23)$$

Well-known relation for derivatives  $(\partial P / \partial V)_T (\partial V / \partial T)_P (\partial T / \partial P)_V = -1$  and definition (23) give a mathematical connection between them

$$\alpha_p = \beta_v k_T P. \quad (24)$$

Along with the coefficients listed above, we can also express the difference between the isobaric and isochoric heat capacities of the gas (analogue of Mayer's relation), determined by the relation

$$\Delta c = c_p - c_v = T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = -T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V^2 \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T^{-1}. \quad (25)$$

In [13], reduced forms of determining these thermal coefficients (23) and the difference (25) are proposed:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{T_{kp}} \tilde{\alpha}_p; & \tilde{\alpha}_p &= \frac{1}{\tilde{V}} \left( \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{P}} = -\frac{1}{\tilde{V}} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}}^{-1}; \\ \beta_v &= \frac{1}{P} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = \frac{1}{T_{kp}} \tilde{\beta}_v; & \tilde{\beta}_v &= \frac{1}{\tilde{P}} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}}; \\ k_T &= -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{P_{kp}} \tilde{k}_T; & \tilde{k}_T &= -\frac{1}{\tilde{V}} \left( \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{P}} \right)_{\tilde{T}} = -\frac{1}{\tilde{V}} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}}^{-1}; \\ \Delta c &= \frac{P_{kp} V_{kp}}{T_{kp}} \Delta \tilde{c}; & \Delta \tilde{c} &= -\tilde{T} \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}}^2 \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}}^{-1}. \end{aligned} \quad (26)$$

In this case, formula (24) for the reduced coefficients has the form  $\tilde{\alpha}_p = \tilde{\beta}_v \tilde{k}_T \tilde{P}$ .

Let us consider the reduced coefficients in the Redlich-Kwong gas model. From (6) we find the partial derivatives appearing in (26)

$$\left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}} = \frac{3}{\tilde{V} - \xi} + \frac{1}{2\xi \tilde{T}^{3/2} \tilde{V} (\tilde{V} + \xi)}; \quad \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}} = \frac{2\tilde{V} + \xi}{\xi \tilde{T}^{1/2} \tilde{V}^2 (\tilde{V} + \xi)^2} - \frac{3\tilde{T}}{(\tilde{V} - \xi)^2}. \quad (27)$$

Substituting (27) into definition (26) and taking into account equation (6), we received: two expressions for  $\tilde{\alpha}_p$  and  $\tilde{\beta}_v$ , one expression for  $\tilde{k}_T$  and for  $\Delta \tilde{c}$ . We list them below

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_p(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{(\tilde{V} + \xi)(\tilde{V} - \xi)[6\xi \tilde{T}^{3/2} \tilde{V} (\tilde{V} + \xi) + \tilde{V} - \xi]}{2\tilde{T}[3\xi \tilde{V}^2 \tilde{T}^{3/2} (\tilde{V} + \xi)^2 - (2\tilde{V} + \xi)(\tilde{V} - \xi)^2]}, \\ \tilde{\alpha}_p(\tilde{P}, \tilde{V}, \tilde{T}) &\equiv \frac{(\tilde{V}^2 - \xi^2)[9\tilde{T} - \tilde{P}(\tilde{V} - \xi)]}{2\tilde{T}[3\tilde{T}\tilde{V}(\tilde{V} + \xi) - (2\tilde{V} + \xi)(\tilde{V} - \xi)(3\tilde{T} - \tilde{P}\tilde{V} + \tilde{P}\xi)]}, \\ \tilde{\beta}_v(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{6\xi \tilde{V} \tilde{T}^{3/2} (\tilde{V} + \xi) + \tilde{V} - \xi}{2\tilde{T}[3\xi \tilde{V} \tilde{T}^{3/2} (\tilde{V} + \xi) - \tilde{V} + \xi]}, \\ \tilde{\beta}_v(\tilde{P}, \tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{3}{\tilde{P}(\tilde{V} - \xi)} + \frac{1}{2\xi \tilde{P} \tilde{T}^{3/2} \tilde{V} (\tilde{V} + \xi)}, \\ \tilde{k}_T(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{\xi \tilde{V} \sqrt{\tilde{T}} (\tilde{V} - \xi)^2 (\tilde{V} + \xi)^2}{3\xi \tilde{V}^2 \tilde{T}^{3/2} (\tilde{V} + \xi)^2 - (2\tilde{V} + \xi)(\tilde{V} - \xi)^2}, \\ \Delta \tilde{c}(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{[6\xi \tilde{V} \tilde{T}^{3/2} (\tilde{V} + \xi) + \tilde{V} - \xi]^2}{4\xi \tilde{T}^{3/2} [3\xi \tilde{V}^2 \tilde{T}^{3/2} (\tilde{V} + \xi)^2 - (2\tilde{V} + \xi)(\tilde{V} - \xi)^2]}. \end{aligned}$$

The coefficients and the analogue of Mayer's relation for Soave-Redlich-Kwong reduced equation of state (9) in the optimal form for calculations can be written using additional function  $D(\tilde{V}, \xi)$  as follows:

$$\begin{aligned} D(\tilde{V}, \xi) &= \frac{\tilde{V} - \xi}{\tilde{V} + \xi}; \\ \tilde{\alpha}_p(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{(\tilde{V} - \xi)[3\xi \tilde{V} - \alpha'(\tilde{T})D(\tilde{V}, \xi)]}{3\xi \tilde{V}^2 \tilde{T} - \alpha(\tilde{T})(2\tilde{V} + \xi)D^2(\tilde{V}, \xi)}; \\ \tilde{\beta}_v(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{3\xi \tilde{V} - \alpha'(\tilde{T})D(\tilde{V}, \xi)}{3\xi \tilde{V} \tilde{T} - \alpha(\tilde{T})D(\tilde{V}, \xi)}; \\ \tilde{k}_T(\tilde{V}, \tilde{T}) &= \frac{\xi \tilde{V} (\tilde{V} - \xi)^2}{3\xi \tilde{V}^2 \tilde{T} - \alpha(\tilde{T})(2\tilde{V} + \xi)D^2(\tilde{V}, \xi)}; \end{aligned}$$

$$\Delta\tilde{c}(\tilde{V}, \tilde{T}) = \frac{\tilde{T} [3\xi\tilde{V} - \alpha'(\tilde{T})D(\tilde{V}, \xi)]^2}{3\xi^2\tilde{V}^2\tilde{T} - \alpha(\tilde{T})\xi(2\tilde{V} + \xi)D^2(\tilde{V}, \xi)}.$$

**Conclusion.** In the paper we consider reduced forms of several equations of state for real gases, introduce the reduced coefficient of the Joule–Thomson effect, and obtain evident reduced forms for the inversion curves of the Joule–Thomson effect. Definitions of the reduced thermal coefficients (isobaric volume expansion coefficient, isochoric thermal pressure coefficient, isothermal compressibility) and analogue of Mayer’s relation are proposed as well. Explicit reduced expressions for them are obtained for the Redlich–Kwong and the Soave–Redlich–Kwong equations of state.

This approach based on the systematic use of the reduced variables was also implemented in [14], where the numerical values of the reduced parameters of the boundary state, which determines the occurrence of the stretched liquid phase, were obtained for several most used two–parameter equations of state for real gas.

The results obtained in the paper show that almost all analytical expressions for thermodynamic relationships and parameters of gases and liquids can be formulated in terms of the reduced variables. In this case, reduced analogues of thermodynamic quantities used in practice are obtained, which are dimensionless and applicable for all real gases described by any equation of state. This approach, in a certain sense, expands the field of applicability of the law of corresponding states and can be used as a basis for analyzing the applicability of various equations of state for real gases to the description of experimental data, as well as for predicting the physical characteristics of new substances based on the law of corresponding states.

## References

1. Rumer, Yu. B. Thermodynamics, statistical physics and kinetics / Yu. B. Rumer, M. Sh. Ryvkin. – Novosibirsk : NSU, 2000. – 608 p. (in Russian).
2. Kudinov, V. A. Technical thermodynamics and heat transfer / V. A. Kudinov, E. M. Kartashov, E. V. Stefanyuk. – M. : Urait, 2021. – 454 p. (in Russian).
3. Kirichenko, P. A. Thermodynamics, statistical and molecular physics / P. A. Kirichenko. – M. : Fizmatkniga, 2005. – 176 p. (in Russian).
4. Redlich, O. On the thermodynamics of solutions V. Equation of state : fugacity of gaseous solutions / O. Redlich, J. N. S. Kwong // Chemical Reviews. – 1949. – V. 44. – P. 233–244.
5. Soave, G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state / G. Soave // Chem. Eng. Sci. – 1972. – V. 2. – P. 1197–1203.
6. Ishikawa, T. A cubic perturbed, hard sphere equation of state for thermodynamic properties and Vapor-Liquid equilibrium calculations / T. Ishikawa, W. K. Chung, B. C. Y. Lu // AIChE Journal. – 1980. – V. 26. – P. 372–378.
7. Fogel’son, R. L. Equation of state of real gas / R. L. Fogel’son, E. R. Likhachev // Technical Physics. – 2004. – V. 74, iss. 7. – P. 129–130 (in Russian).
8. Farrokh–Niae, A. H. A three-parameter cubic equation of state for prediction of thermodynamics properties of fluids / A. H. Farrokh–Niae, H. Moddarress, M. Mohsen–Nia // J. Chem. Thermodynamics. – 2008. – V. 40. – P. 84–95.
9. Zhao, W. A review of the alpha functions of cubic equations of state for different research systems / W. Zhao, L. Xia, X. Sun, Sh. Xiang // International Journal of Thermophysics. – 2019. – V. 40, № 12. – P. 1–25.
10. Dey, E. A. Isoenthalpic cooling parameters calculation for Redlich-Kwong gases / E. A. Dey, O. V. Novikova, G. Yu. Tyumenkov // Proceedings of F. Skorina GSU. – 2012. – № 6 (75). – P. 39–42 (in Russian).
11. Dey, E. A. Inversion curves of the Joule-Thomson effect for generalized van der Waals equation / E. A. Dey, G. Yu. Tyumenkov // Proceedings of F. Skorina GSU. – 2015. – № 6 (93). – P. 117–20 (in Russian).
12. Dey, E. A. Properties of non-ideal gas in the Ishikawa-Chung-Lu model / E. A. Dey, G. Yu. Tyumenkov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2017. – № 4 (33). – P. 11–16 (in Russian).
13. Dey, E. A. On the reduced form of thermodynamic coefficients of real gases / E. A. Dey, G. Yu. Tyumenkov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 4 (53). – P. 25–29 (in Russian).
14. Dey, E. A. Boundary parameters for stretched fluid state / E. A. Dey, G. Yu. Tyumenkov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2018. – № 4 (37). – P. 18–20 (in Russian).
15. Hendricks, R. C. Joule-Thomson inversion curves and related coefficients for several simple fluids / R. C. Hendricks, I. C. Peller, A. K. Baron. – Washington : NASA Technical Note TN D-6807, 1972. – 59 p.

## Оптимизация лазерного раскалывания силикатных стекол эллиптическими пучками при дополнительном воздействии потока горячего воздуха

Ю.В. НИКИТЮК<sup>1</sup>, А.Н. СЕРДЮКОВ<sup>1</sup>, И.Ю. АУШЕВ<sup>2</sup>

В работе были проведены исследования лазерного раскалывания силикатных стекол с использованием дополнительного воздействия потока горячего воздуха. Для выполнения расчетов температур и термоупругих напряжений был использован язык программирования APDL. Численный эксперимент был проведен с использованием центрального композиционного плана. В результате были созданы регрессионные и нейросетевые модели процесса лазерного раскалывания стекла с применением дополнительного потока горячего воздуха. Был проведен сравнительный анализ полученных моделей. Для оптимизации параметров процесса был применен генетический алгоритм. Оптимизация выполнялась по двум критериям: максимуму скорости резки и максимуму значений термоупругих напряжений в зоне обработки. Полученные результаты демонстрируют возможности использования технологии метамоделирования для определения оптимальных параметров процесса лазерной обработки силикатного стекла при дополнительном воздействии потока горячего воздуха.

**Ключевые слова:** лазерное раскалывание, поток горячего воздуха, искусственная нейронная сеть, генетический алгоритм.

In this work, studies were carried out on laser cleaving of silicate glasses using additional exposure to a hot air flow. The APDL programming language was used to perform temperature and thermoelastic stress calculations. The numerical experiment was carried out using the central composition plan. As a result, regression and neural network models of the laser glass cleaving process were created using an additional hot air flow. A comparative analysis of the obtained models was carried out. To optimize the process parameters, a genetic algorithm was applied. Optimization was carried out according to two criteria: the maximum cutting speed and the maximum values of thermoelastic stresses in the processing zone. The results obtained demonstrate the possibility of using the metamodeling technology to determine the optimal parameters of the process of laser processing of silicate glass under the additional action of a hot air flow.

**Keywords:** laser cleaving, hot air flow, artificial neural network, genetic algorithm.

**Введение.** В настоящее время методы лазерной резки хрупких неметаллических материалов получили широкое распространение. Среди этих методов особенно эффективным является управляемое лазерное раскалывание, которое отличается высокой скоростью и точностью разделения [1]–[9]. Этот метод обработки имеет некоторые недостатки, связанные с нестабильностью процесса образования трещин, вызванной использованием воздушно-водяной смеси в качестве хладагента. При использовании такого варианта охлаждения, из-за недостаточно высокой скорости движения жидкости по поверхности материала, на ней образуется зона с нестабильным слабым охлаждением, что отрицательно сказывается на надежности процесса формирования лазерно-индуцированных трещин. Для преодоления этой проблемы предлагается использование совместного воздействия лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха на обрабатываемую поверхность [10]–[11].

Совместное использование потока горячего воздуха с лазерным излучением и хладагентом предоставляет возможность более эффективного контроля процесса образования трещин, что в свою очередь повышает стабильность и надежность процесса лазерного раскалывания. Такое комбинированное воздействие обеспечивает новые возможности для улучшения качества и производительности данного метода лазерной резки неметаллических материалов.

В ряде случаев оптимизация параметров лазерной обработки материалов может быть эффективно осуществлена с использованием суррогатных моделей, которые характеризуются высокой вычислительной эффективностью [12]–[13]. Такие модели позволяют определять выходные параметры, связанные с процессом лазерной обработки, без необходимости выполнения полных расчетов, включая использование регрессионных или нейросетевых моделей [14]–[15]. Следующим этапом применения суррогатных моделей является выбор оптимальных технологических режимов лазерной обработки, в том числе с применением генетических алгоритмов [16]–[18].

В данной работе было выполнено определение оптимальных параметров лазерного раскалывания силикатных стекол при применении эллиптических лазерных пучков и дополнительного воздействия потока горячего воздуха. Применение генетического алгоритма для нахождения эффективных комбинаций технологических параметров процесса обработки силикатного стекла обеспечило повышение производительности и качества обработки силикатных стекол.

**Метамоделирование и определение оптимальных параметров резки стекла.** Моделирование температурных полей и полей термоупругих напряжений, формируемых в силикатных стеклах при обработке эллиптическим лазерным пучком, потоком горячего воздуха и хладагентом, выполнялось в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с использованием языка программирования APDL в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.

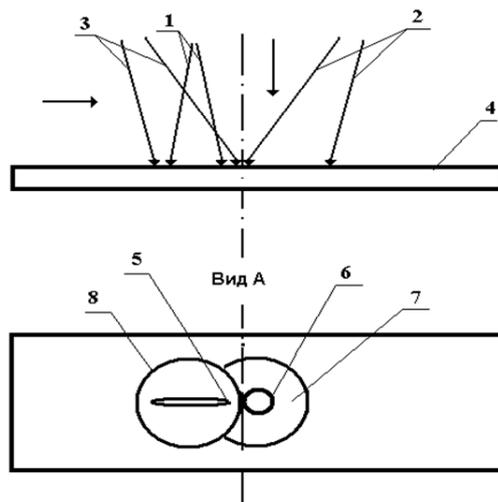


Рисунок 1 – Схема пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента: 1 – лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм, 2 – хладагент, 3 – поток горячего воздуха, 4 – обрабатываемое изделие из стекла, 5 – сечение лазерного пучка 1 в плоскости обработки, 6 – зона интенсивного охлаждения, 7 – пленка из жидкости растекающегося хладагента, 8 – зона воздействия потока горячего воздуха

Для расчетов были использованы свойства силикатного стекла, приведенные в работе [11]. Расчеты были выполнены для прямоугольного образца размерами  $3 \times 2 \times 0,3$  мм, разбитого на 61920 элементов.

Скорость обработки была равна  $V = 30$  мм/с. Использовались следующие параметры обработки: мощность лазерного излучения  $P = 10$  Вт, большая полуось лазерного пучка  $A = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, малая полуось  $B = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м, температура горячего воздуха в центре пятна нагрева  $T_v = 523$  °К, диаметр сопла устройства подачи горячего воздуха  $D = 0,003$  м, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности  $Z = 0,01$  м.

При расчете коэффициентов теплоотдачи в зоне воздействия направленного потока горячего воздуха на поверхность силикатного стекла использовалась зависимость, используемая в работах [19]–[20]. Для определения направления развития лазерно-индуцированной трещины был применен критерий максимальных растягивающих напряжений.

На рисунках 2–3 представлены расчетные распределения температурных полей и полей термоупругих напряжений.

При совместном воздействии на поверхность силикатного стекла лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха кроме локальной зоны высоких температур, обусловленной воздействием лазерного излучения, на поверхности материала формируется дополнительная зона повышенных температур. Наличие данной зоны обусловлено дополнительным воздействием потока горячего воздуха. При этом использование этого дополнительного воздействия не приводит к принципиальным отличиям в пространственном распределении зон напряжения растяжения и сжатия по сравнению со случаем управляемого лазерного раскалывания [11].

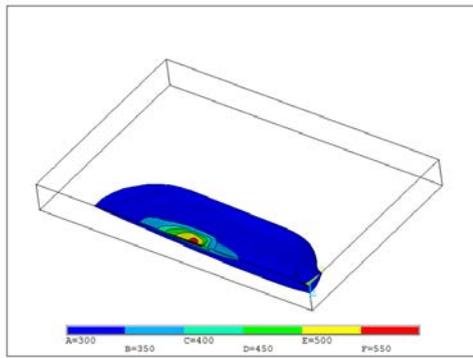


Рисунок 2 – Распределение температуры (К) при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента

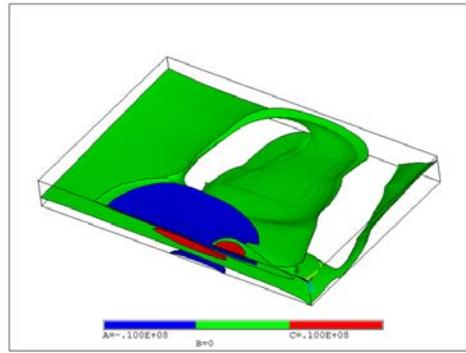


Рисунок 3 – Распределение напряжений  $\sigma_y$  (МПа) при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента

Для выполнения численного эксперимента был использован гранецентрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента для пяти факторов (P1–P5): P1 – скорость обработки V, P2 – мощность лазера P, P3 – большая полуось лазерного пучка A, P4 – малая полуось пучка B, P5 – температура горячего воздуха  $T_v$  в центре пятна нагрева. В эксперименте для 27 комбинаций входных параметров были определены следующие выходные параметры: максимальная температура T и максимальные напряжения растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки (см. таблицу 1).

Таблица 1 – План численного эксперимента и результаты расчетов

N	P1 V, м/с	P2 P, Вт	P3 A, м	P4 B, м	P5 $T_v$ , К	P6 T, К	P7 $\sigma_y$ , МПа
1	0,025	10	0,0025	0,0015	523	593	33
2	0,02	10	0,0025	0,0015	523	629	42
3	0,03	10	0,0025	0,0015	523	565	27
4	0,025	5	0,0025	0,0015	523	462	20
5	0,025	15	0,0025	0,0015	523	723	47
6	0,025	10	0,002	0,0015	523	616	32
7	0,025	10	0,003	0,0015	523	568	33
8	0,025	10	0,0025	0,001	523	713	45
9	0,025	10	0,0025	0,002	523	528	25
10	0,025	10	0,0025	0,0015	473	584	32
11	0,025	10	0,0025	0,0015	573	601	35
12	0,02	5	0,002	0,001	573	583	34
13	0,03	5	0,002	0,001	473	510	19
14	0,02	15	0,002	0,001	473	1026	76
15	0,03	15	0,002	0,001	573	897	51
16	0,02	5	0,003	0,001	473	518	30
17	0,03	5	0,003	0,001	573	491	21
18	0,02	15	0,003	0,001	573	929	82
19	0,03	15	0,003	0,001	473	800	53
20	0,02	5	0,002	0,002	473	449	18
21	0,03	5	0,002	0,002	573	438	14
22	0,02	15	0,002	0,002	573	710	44
23	0,03	15	0,002	0,002	473	608	25
24	0,02	5	0,003	0,002	573	436	20
25	0,03	5	0,003	0,002	473	398	11
26	0,02	15	0,003	0,002	473	630	43
27	0,03	15	0,003	0,002	573	577	29

Функции отклика были использованы для установления связи между выходными параметрами (T,  $\sigma_y$ ) и факторами (V, P, A, B,  $T_v$ ).

Соответствующие уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y_T &= 6,54 - 8,99 \cdot V + 1,18 \cdot 10^{-1} \cdot P \\
 &- 5,62 \cdot 10^2 \cdot B - 9,89 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 \\
 &+ 1,41 \cdot 10^5 \cdot B^2 - 5,56 \cdot 10^{-1} \cdot V \cdot P + 2,78 \cdot 10^3 \cdot V \cdot B \\
 &- 5,03 \cdot P \cdot A - 1,69 \cdot 10 \cdot P \cdot B - 1,82 \cdot 10^4 \cdot A \cdot B \\
 T &= e^{(Y_T)} - 1 \\
 Y_\sigma &= 4,22 \cdot 10 - 4,33 \cdot 10^2 \cdot V + 7,83 \cdot 10^{-1} \cdot P + 1,74 \cdot 10^3 \cdot A \\
 &- 2,09 \cdot 10^3 \cdot B + 4,26 \cdot 10^3 \cdot V^2 - 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot P^2 \\
 &- 3,50 \cdot 10^5 \cdot A \cdot B - 8,24 \cdot 10^{-1} \cdot A \cdot T_V + 2,67 \cdot B \cdot T_V \\
 \sigma_y &= (Y_\sigma \cdot 0,085 + 1)^{\left(\frac{1}{0,085}\right)} - 1.
 \end{aligned}$$

Было обнаружено, что мощность лазера оказывает наибольшее влияние на максимальные значения температур и максимальные значения напряжений растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки. Также, скорость обработки и размеры малой полуоси эллиптического пучка значительно влияют на функции отклика. При этом размеры большой полуоси пучка оказывают заметное влияние на значения максимальных температур, а температура горячего воздуха влияет на максимальные напряжения растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки.

На рисунках 4–7 представлены зависимости максимальных температур и максимальных напряжений растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки от наиболее значимых факторов.

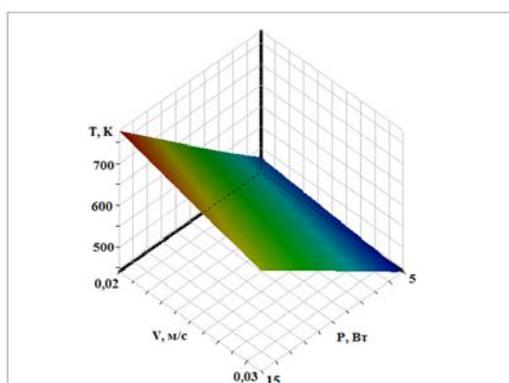


Рисунок 4 – Зависимость максимальной температуры  $T$  от параметров обработки  $P1 = V$  и  $P2 = P$

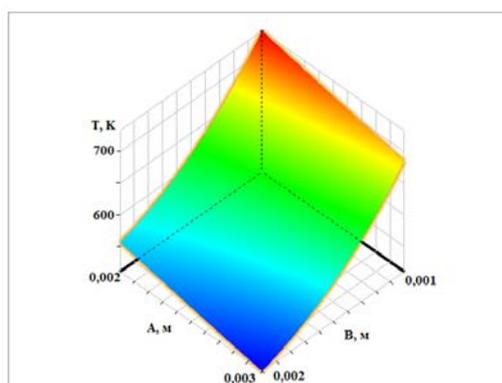


Рисунок 5 – Зависимость максимальной температуры  $T$  от параметров обработки  $P3 = A$  и  $P4 = B$

Было проведено моделирование процесса лазерного раскалывания силикатных стёкол с использованием искусственных нейронных сетей в соответствии с алгоритмом, описанным в работе [15]. Для обучения и тестирования нейронных сетей были сформированы выборки, полученные с помощью метода конечных элементов. При этом было использовано 27 комбинаций плана численного эксперимента, которые были дополнены ещё 200 комбинациями.

Для построения искусственных нейронных сетей с двумя скрытыми слоями была применена программа TensorFlow. В процессе формирования нейронных сетей использовались оптимизатор Adam, функция активации ReLu и функция потерь MSE. Обучение нейронной сети проходило в течение 500 эпох. Всего было построено 16 искусственных нейронных сетей, в которых число нейронов в скрытых слоях варьировалось от 5 до 20 с шагом 5.

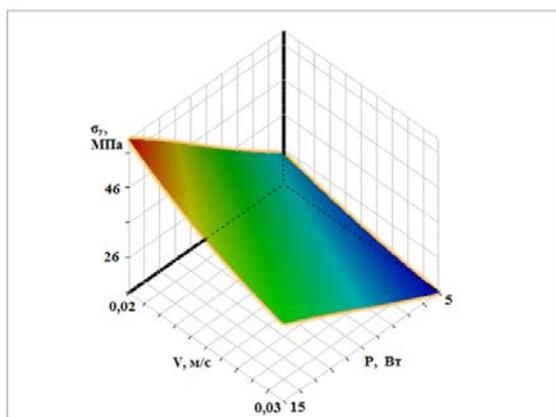


Рисунок 6 – Зависимость максимальных напряжения растяжения  $\sigma_y$  от параметров обработки P1 = V и P2 = P

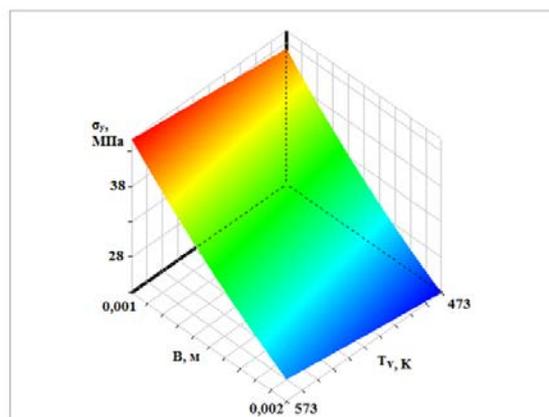


Рисунок 7 – Зависимость максимальных напряжения растяжения  $\sigma_y$  от параметров обработки P4 = B и P5 =  $T_v$

Для тестирования регрессионных и нейросетевых моделей был использован набор данных, представленный в таблице 2.

Таблица 2 – Тестовый набор параметров

№	P1 V, м/с	P2 P, Вт	P3 A, м	P4 B, м	P5 $T_v$ , К	P6 T, К	P7 $\sigma_y$ , МПа
1	0,021	6	0,002	0,001	555	617	36
2	0,026	14	0,002	0,002	566	632	31
3	0,021	13	0,003	0,001	488	824	67
4	0,025	5	0,002	0,002	474	433	14
5	0,021	12	0,003	0,001	484	785	62
6	0,023	14	0,003	0,002	532	595	36
7	0,024	11	0,002	0,002	552	580	28
8	0,029	5	0,003	0,001	562	493	22
9	0,029	14	0,002	0,001	562	869	50
10	0,023	14	0,002	0,001	546	945	64

Качество созданных моделей оценивалось при помощи средней абсолютной ошибки (англ. MAE), средней квадратичной ошибки (англ. RMSE), средней абсолютной процентной ошибки (англ. MAPE) и коэффициента детерминации  $R^2$  [15]. На рисунках 8–9 представлены тепловые карты распределения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) при определении значений максимальной температуры и значений максимальных напряжений растяжения. На осях y (вертикальная) и x (горизонтальная) отмечено количество нейронов в первом и во втором скрытом слоях искусственной нейронной сети соответственно. Величина ошибки представлена интенсивностью цветового обозначения: увеличение ошибки от светлого к темному. В ходе численного эксперимента было установлено, что лучшие результаты показывает искусственная нейронная сеть с архитектурой [5-10-15-2].

Значения соответствующих критериев для регрессионных и нейросетевых моделей представлены в таблице 3. Результаты оценки полученных моделей указывают на необходимость метамодели результатов конечно-элементного анализа. При этом определенная в результате численного эксперимента архитектура нейросетевой модели оказалась лучше при прогнозировании параметров лазерного раскалывания силикатных стекол с использованием дополнительного потока горячего воздуха по сравнению с регрессионными моделями.

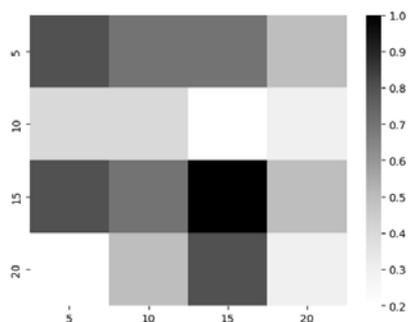


Рисунок 8 – Тепловая карта распределения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) при определении  $T$

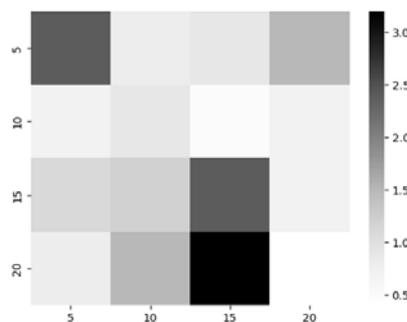


Рисунок 9 – Тепловая карта распределения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) при определении  $\sigma_y$

Таблица 3 – Результаты оценки регрессионных нейросетевых моделей

Критерий	Регрессионная модель		Нейросетевая модель	
	$T$	$\sigma_y$	$T$	$\sigma_y$
RMSE	11,0 К	0,52 МПа	1,2 К	0,29 МПа
MAE	9,6 К	0,38 МПа	0,9 К	0,22 МПа
MAPE	1,4 %	0,9 %	0,2 %	0,5 %
$R^2$	0,9952	0,9991	0,9999	0,9997

Оптимизации параметров лазерного раскалывания стекла при использовании дополнительного воздействия потока горячего воздуха была выполнена с использованием модуля DesignXplorer программы Ansys в соответствии с алгоритмом, представленным в работе [17].

При оптимизации с использованием генетического алгоритма MOGA с числом индивидов начальной популяции, равным 500, и с числом индивидов за итерацию, равным также 500, были применены следующие критерии для оптимизации раскалывания стекла:  $V \rightarrow \max$ ,  $\sigma_y \rightarrow \max$  и при  $T \leq 789$  К.

В таблице 4 представлены результаты проведённой оптимизации (значения параметров, полученные при помощи конечно-элементного расчёта, приведены в скобках).

Таблица 4 – Результаты оптимизации с использованием генетического алгоритма

P1 $V$ , м/с	P2 $P$ , Вт	P3 $A$ , м	P4 $B$ , м	P5 $T_v$ , К	P6 $T$ , К	P7 $\sigma_y$ , МПа
0,03	14	0,003	0,001	533	748 (775)	48 (50)

Применение генетического алгоритма обеспечило максимальную относительную погрешность результатов, не превышающую 4 % при определении температур и при определении термоупругих напряжений.

**Заключение.** Выполненная в работе оптимизация технологических параметров лазерной обработки изделий из силикатного стекла с дополнительным воздействием потока горячего воздуха показывает возможность использования технологии метамоделирования для определения оптимальных технологических режимов лазерного раскалывания, обеспечивая повышение эффективности процесса создания лазерноиндуцированных трещин.

## Литература

1. Nisar, S. Laser glass cutting techniques – A review / S. Nisar // Journal of laser applications. – 2013. – Vol. 25, № 4. – P. 042010–1-11.
2. Laser cutting of ceramic materials with a metallized surface / S. V. Shalupaev, A. V. Maksimenko, V. N. Myshkovets, Y. V. Nikityuk // Journal of Optical Technology. – 2001. – Vol. 68, № 10. – P. 758–760. – DOI : 10.1364/JOT.68.000758.
3. Two-beam laser thermal cleavage of brittle nonmetallic materials / S. V. Shalupaev, E. B. Shershnev, Y. V. Nikityuk, A. A. Sereda // Journal of Optical Technology. – 2006. – Vol. 73, № 5. – P. 356–359. – DOI : 10.1364/JOT.73.000356.

4. Serdyukov, A. N. Features of controlled laser thermal cleavage of crystalline silicon / A. N. Serdyukov, S. V. Shalupaev, Y. V. Nikityuk // *Crystallography Reports*. – 2010. – Vol. 55, № 6. – P. 933-937. – DOI : 10.1134/S1063774510060064.
5. Features of controlled laser thermal cleavage of crystal quartz / A. N. Serdyukov, E. B. Shershnev, Y. V. Nikityuk [et al.] // *Crystallography Reports*. – 2012. – Vol. 57, № 6. – P. 792–797. – DOI : 10.1134/S1063774512060120.
6. Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon / S. V. Shalupaev, A. N. Serdyukov, Y. V. Nikitjuk [et al.] // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 1381–1385. – DOI : 10.2478/amm-2013-0179.
7. Nikitjuk, Y. V. Laser splitting of bilayer structures made of silicon wafers and glass substrates / Y. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. – 2021. – № 6 (129). – P. 178–183.
8. Dual laser beam revising the separation path technology of laser induced thermal-crack propagation for asymmetric linear cutting glass / C. Zhao, H. Zhang, L. Yang [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 106. – P. 43–55. – DOI : 10.1016/j.ijmachtools.2016.04.005.
9. Research Progress of Thermal Controlled Cracking of Hard-Brittle Plate / H. L. Wang, Y. Wang, H. Z. Zhang, X. W. Wang // *Wuji Cailiao Xuebao*. – 2018. – Vol. 33, № 9. – P. 923–930. – DOI : 10.15541/jim20170546.
10. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений : пат 10022 Респ. Беларусь, МПК С 03В 33/00 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середва ; заявитель Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – № а 20050697 ; заявл. 11.07.05.
11. Особенности лазерного термораскалывания при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середва [и др.] // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2009. – № 4-1 (55). – С. 199–203.
12. Jiang P. Surrogate model-based engineering design and optimization / P. Jiang, Q. Zhou, X. Shao. – Singapore : Springer, 2020. – 240 p.
13. Parandoush, P. A review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush, A. Hossain // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2014. – № 85. – P. 135–145.
14. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых золь-гель стекол эллиптическими лазерными пучками / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, В. А. Прохоренко, И. Ю. Аушев // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2021. – № 3 (48). – С. 30–36.
15. Nikitjuk, Yu. V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Yu. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Journal of the Belarusian State University. Physics*. – 2022. – № 1. – P. 35–43. – DOI : 10.33581/2520-2243-2022-1-35-43.
16. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28. – DOI : 10.54341/20778708\_2021\_4\_49\_21.
17. Nikityuk, Yu. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Journal of Optical Technology*. – 2022. – Vol. 89, № 2. – P. 121–125. – DOI : 10.1364/JOT.89.000121.
18. Nikityuk Yu. V. Parameters optimization of silicate glass two-beam asymmetric laser splitting / Y. V. Nikityuk, A. A. Sereda, A. N. Serdyukov [et al.] // *Opticheskii Zhurnal*. – 2023. – V. 90, № 6. – P. 15–24.
19. Shahani, A. R. Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet / A. R. Shahani, M. Seyyedian // *International Journal of Solids and Structures*. – 2004. – Vol. 41. – P. 1313–1329.
20. Никитюк, Ю. В. Исследование процесса управляемого термораскалывания хрупких неметаллических материалов под действием потока горячего воздуха / Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2011. – № 1 (6). – С. 36–39.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь

## Метаповерхность с функцией пропускающего кросс-поляризатора на основе одновитковых планарных спиралей

И.А. ФАНЯЕВ<sup>1</sup>, А.Л. САМОФАЛОВ<sup>1</sup>, А.Ю. КРАВЧЕНКО<sup>2</sup>, И.В. СЕМЧЕНКО<sup>3</sup>, С.А. ХАХОМОВ<sup>1</sup>

В работе предложена модель ультратонкого пропускающего кросс-поляризатора, состоящего из планарных одновитковых спиралей, поворачивающего плоскость поляризации прошедшей линейно поляризованной волны приблизительно на  $90^\circ$  вблизи резонансной частоты. С использованием численного моделирования проведена оптимизация элементов метаповерхности и найдено оптимальное расположение планарных спиралей в решетке. Приведены частотные зависимости основных коэффициентов, подтверждающие эффективность использования предложенной структуры в качестве пропускающего кросс-поляризатора. Коэффициент пропускания составил 0,8, эллиптичность не превышает  $6^\circ$ , а угол поворота составил  $95^\circ$  на резонансной частоте. Предлагаемая модель электрически тонкой метаповерхности с функцией кросс-поляризационного полного прохождения найдет применение в антенной и СВЧ технике.

**Ключевые слова:** метаповерхность, планарный элемент, кросс-поляризатор, коэффициент прохождения, эллиптичность.

In this work, we propose an ultrathin transmitting cross-polarizer based on planar single-turn spirals, which rotates the plane of polarization of the transmitted linearly polarized wave by approximately  $90^\circ$  near the resonant frequency. Using numerical modeling, the metasurface elements were optimized and the optimal arrangement of planar spirals in the lattice was found. The frequency dependences of the main coefficients are presented, confirming the effectiveness of using the proposed structure as a transmitting cross-polarizer. The transmittance was 0,8, the ellipticity did not exceed  $6^\circ$ , and the rotation angle was  $95^\circ$  at the resonant frequency. The proposed electrically thin metasurface with the function of cross-polarization full transmission will find application in antenna and microwave technology.

**Keywords:** metasurface, planar element, cross-polarizer, transmission coefficient, ellipticity.

**Введение.** Вращение поляризации электромагнитных волн играет важную роль во многих оптоэлектронных устройствах. Киральные метаматериалы, которые представляют собой разновидность метаматериалов, были предложены в качестве альтернативного пути реализации отрицательного показателя преломления [1]–[3], а также используются для достижения сильного вращения поляризации. При использовании обычных материалов возможно поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованной электромагнитной волны на фиксированный угол с единичным коэффициентом прохождения, но для этого обычно требуется значительная толщина образца. В классической оптике хорошо известны, например, естественные гиротропные среды, магнитоактивные среды с эффектом Фарадея, холестерические жидкие кристаллы, одноосные и двуосные кристаллы [4], [5]. В литературе известно большое разнообразие преобразователей поляризации для различных применений [6], таких как создание селективности по круговой поляризации и циркулярного дихроизма [7], вращение поляризации плоской волны с линейной поляризацией [8] и преобразование линейной поляризации в круговую [9].

В метаматериалах, в сравнении с обычными средами, вращение плоскости поляризации можно осуществить для образцов малой толщины. Однако стоит отметить, что вращение поляризации киральными метаматериалами может меняться только лишь при наклонном падении [10] или вращение поляризации на один и тот же угол невозможно получить без изменения геометрических параметров подложки при изменении ее диэлектрической проницаемости. Поэтому реализация вращателя поляризации, который не зависит от углов падения или может реализовать постоянный угол вращения поляризации для различной диэлектрической проницаемости подложки, по-прежнему остается актуальной задачей.

Одним из устройств, которые вращают плоскость поляризации линейно поляризованной падающей волны на  $90^\circ$  при прохождении волны, является кросс-поляризатор прошедшей волны. Это устройство преобразует поляризацию, в которой поперечная электрическая (ТЕ) поляризованная волна преобразуется в поперечную магнитную (ТМ) поляризованную волну и наоборот [11], [12]. Как правило, эти структуры имеют толщину, сравнимую с рабочей длиной

волны, что является важным недостатком для их применения для СВЧ частот. Этот недостаток можно преодолеть, используя типичные киральные трехслойные метаповерхности, которые имеют электрически тонкую толщину (намного меньшую, чем рабочая длина волны) и обладают сильной оптической активностью в СВЧ диапазоне [10], [13], [14]. Тем не менее, подобные трехслойные конструкции не лишены недостатков, к которым можно отнести следующие: зависимость от поляризации падающей волны, неединичный коэффициент прохождения, расщепление резонансной полосы и непрозрачность вне резонанса [15]. Также в литературе предлагаются другие метаповерхности, некоторые недостатки которых удалось преодолеть [16]–[20].

В данной работе предлагается ультратонкий пропускающий кросс-поляризатор, основанный на планарных одновитковых спиральях, поворачивающий плоскость поляризации прошедшей линейно поляризованной волны на  $90^\circ$  относительно падающей волны на резонансной частоте. Вне резонанса он является прозрачным в широкой полосе частот. Предлагаемая электрически тонкая метаповерхность с указанной выше функцией может найти достаточно много применений в антенной и СВЧ технике.

**Условия для получения кросс-поляризатора.** Для реализации пропускающего кросс-поляризатора необходимо достижение баланса электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаповерхности. В качестве элемента метаповерхности мы рассматриваем одновитковую планарную спираль (рисунок 1). Под действием падающей плоской электромагнитной волны в такой одновитковой планарной спирали индуцируются дипольные моменты, которые можно выразить через компоненты тензоров электрических, магнитных, электромагнитных и магнитоэлектрических поляризуемостей [21].



Рисунок 1 – Вид одновитковой планарной спирали с указанием параметров

Рассмотрим уравнения, описывающие поля пропускающего кросс-поляризатора, поворачивающего плоскость поляризации прошедшей волны на  $90^\circ$  на резонансной частоте. Оптимальное расположение планарных спиралей для данного преобразования поляризации может быть найдено, если известна требуемая ориентация электрического и магнитного дипольных моментов в элементарной ячейке. Для достижения полной кросс-поляризованной способности прохождения падающей волны ( $|T_{yx}|^2 = |E_t^y/E_0|^2 = 1$ ) компоненты отраженных и прошедших полей должны быть равны:

$$E_r^x = 0, \quad E_t^x = 0, \quad E_r^y = 0, \quad E_t^y = E_0 e^{j\phi_t^{cr}}. \tag{1}$$

Здесь  $\phi_t^{cr}$  – начальная фаза прошедшей волны.

На метаповерхность падает линейно поляризованная плоская волна, распространяющаяся в направлении, задаваемом единичным вектором  $-\vec{z}_0$ , со следующим состоянием поляризации:

$$\vec{E}_{inc} = E_0 \vec{x}_0, \quad \vec{H}_{inc} = -\frac{E_0}{\eta_0} \vec{y}_0. \tag{2}$$

Здесь  $\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$  – орты системы координат,  $E_0$  – амплитуда волны.

С учетом поляризации падающей волны (2) компоненты отраженного  $E_r^{x,y}$  и прошедшего  $E_t^{x,y}$  полей могут быть найдены из уравнений, представленных в [22].

Конечные условия для пропуска кросс-поляризованной волны, основанные на индивидуальных электрических и магнитных дипольных моментах, записываются следующим образом:

$$0 = \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left( \hat{p}_x - \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \tag{3}$$

$$0 = E_0 - \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left( \hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \tag{4}$$

$$0 = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left( \hat{p}_y + \frac{1}{c} \hat{m}_x \right), \tag{5}$$

$$E_0 e^{j\phi_t^{cr}} = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left( \hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \quad (6)$$

Отсюда следует, что

$$\hat{p}_x = \frac{1}{c} \hat{m}_y, \quad (7)$$

$$\frac{2SE_0}{j\omega\eta_0} = \hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y, \quad (8)$$

$$\hat{p}_y = -\frac{1}{c} \hat{m}_x, \quad (9)$$

$$\frac{2SE_0 e^{j\phi_t^{cr}}}{j\omega\eta_0} = -\left( \hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \quad (10)$$

Подставляя уравнение (7) в (8) и (9) в (10), получаем конечные условия

$$\hat{p}_x = \frac{1}{c} \hat{m}_y = -j \frac{SE_0}{\omega\eta_0}, \quad (11)$$

$$\hat{p}_y = -\frac{1}{c} \hat{m}_x = j \frac{SE_0}{\omega\eta_0} e^{j\phi_t^{cr}}. \quad (12)$$

Для количественных характеристик преобразования поляризации необходимо учитывать угол поворота поляризации ( $\theta$ ) и эллиптичность ( $\psi$ ) прошедшей волны. Эти параметры могут быть выражены следующим образом [23]:

$$\theta = \frac{1}{2} [\arg(T_{co} + jT_{cr}) - \arg(T_{co} - jT_{cr})], \quad (13)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{|T_{co} + jT_{cr}|^2 - |T_{co} - jT_{cr}|^2}{|T_{co} + jT_{cr}|^2 + |T_{co} - jT_{cr}|^2} \right). \quad (14)$$

где  $T_{co}$  – коэффициент со-поляризованного прохождения,  $T_{cr}$  – коэффициент кросс-поляризованного прохождения.

Из условий (7)–(12) следует, что x-составляющая электрического момента должна быть равна y-составляющей магнитного момента, а остальные компоненты должны иметь разные знаки. Такая ориентация дипольных моментов должна приводить к повороту поляризации прошедших волн на  $90^\circ$  с коэффициентом прохождения, равным единице.

Полученные условия (11) и (12) показывают необходимую ориентацию и значения составляющих электрического и магнитного дипольных моментов. Данные условия могут быть выполнены при использовании двух ортогональных спиралей с одинаковой киральностью, т. е. достаточным является использование или левозакрученных, или правозакрученных планарных спиралей. При этом для достижения симметричных свойств ячейки метаматериала в ней должно быть четыре спирали, все правозакрученные или левозакрученные, ориентированные относительно обеих координатных осей в плоскости метаповерхности. Это условие может быть применено к любым метаповерхностям с субволновыми поляризованными включениями для достижения требуемых кросс-поляризованных коэффициентов пропускания.

**Моделирование одиночной планарной спирали.** Структурные параметры одновитковой планарной спирали подбирались таким образом, чтобы обеспечить сбалансированное возбуждение электрического и магнитного дипольных моментов (электромагнитный баланс) в метаповерхности. Это привело к сбалансированному электромагнитному отклику на возбуждение линейно поляризованной плоской волной и повороту плоскости поляризации прошедшей волны на угол, близкий к  $90^\circ$ .

В качестве диэлектрика взят материал Taconic TLY толщиной 3,175 мм с двусторонним медным фольгированием, толщиной 35 мкм, относительной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 2,2$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0009.

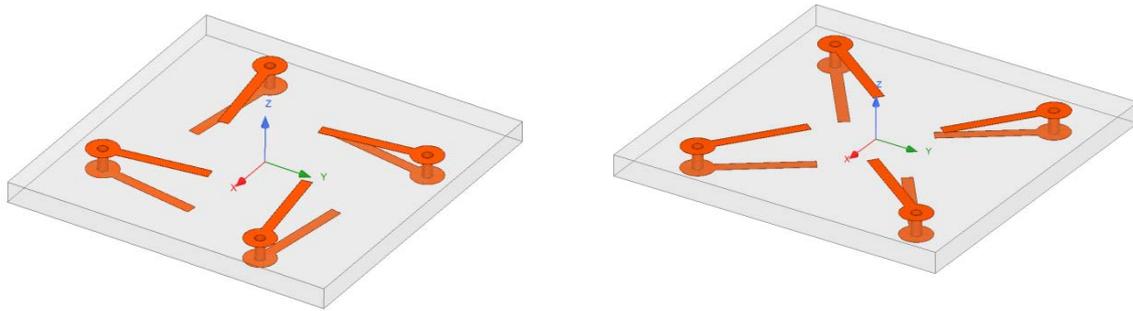
Численные значения оптимизированных параметров приведены в таблице 1, здесь  $\beta$  – угол между металлическими полосками на двух сторонах печатной платы, а – длина полоски, измеряемая от центра отверстия в плате,  $r$  – радиус отверстия с металлизированными стенками,  $w$  – ширина металлической полоски,  $l$  – расстояние между планарными спиральями в ячейке. Вид планарной спирали с указанными параметрами приведен на рисунке 1.

Таблица 1 – Значения параметров пропускающего кросс-поляризатора для двух вариантов расположения спиралей

Параметр	$\beta$ , град	а, мм	г, мм	w, мм	l, мм
Вариант 1	17	16,65	0,75	1,6	11
Вариант 2	17	16,72	0,75	1,6	17,4

**Оптимизация основных параметров модели метаповерхности для получения кросс-поляризационного полного прохождения в СВЧ диапазоне.** На данном этапе, путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов, проведен численный расчет оптимального расположения планарных элементов в решетке для получения кросс-поляризационного полного прохождения при отсутствии отражения и поглощения электромагнитных волн.

Численный расчет структурных параметров планарной спирали и всего пропускающего кросс-поляризатора проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат и доступных в Республике Беларусь материалов. На рисунке 2 показаны два варианта расположения планарных одновитковых спиралей с одинаковой киральностью в элементарной ячейке пропускающего кросс-поляризатора.



Вариант 1

(оси планарных спиралей параллельны сторонам ячейки)

Вариант 2

(оси планарных спиралей параллельны диагоналям ячейки)

Рисунок 2 – Варианты расположения планарных одновитковых спиралей с одинаковой киральностью в элементарной ячейке пропускающего кросс-поляризатора

Изменяя параметры элементарной ячейки, добились равенства как действительных, так и мнимых частей компонент электрического и магнитного дипольного моментов на резонансной частоте, то есть сбалансированности моментов исследуемой ячейки.

На рисунке 3 приведен график частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения ( $R_{co}$ ) и прохождения ( $T_{co}$ ), коэффициентов кросс-поляризованного отражения ( $R_{cr}$ ) и прохождения ( $T_{cr}$ ), а также поглощения ( $A$ ) для рассматриваемой метаповерхности.

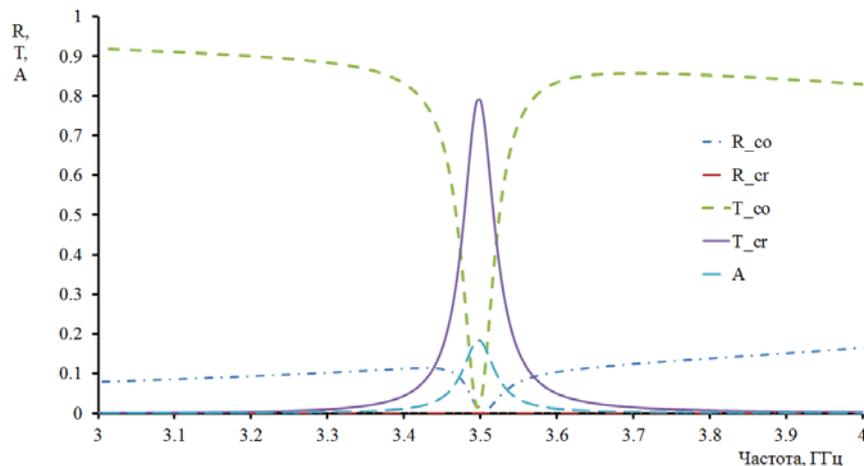


Рисунок 3 – График частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения ( $R_{co}$ ) и прохождения ( $T_{co}$ ), коэффициентов кросс-поляризованного отражения ( $R_{cr}$ ) и прохождения ( $T_{cr}$ ) пропускающего кросс-поляризатора на подложке Taconic TLY

Анализ графика показывает, что с использованием диэлектрика Taconic TLY коэффициент кросс-поляризованного прохождения ( $T_{cr}$ ) принимает значения, близкие к 0,8 на резонансной частоте при двух вариантах расположения спиралей, при этом коэффициент со-

поляризованного прохождения ( $T_{\infty}$ ) в обоих случаях практически равен нулю, что говорит о повороте плоскости поляризации прошедшей электромагнитной волны на  $90^\circ$ . Также из графика следует, что на резонансе происходит поглощение, приблизительно равное 20 %, это связано с потерями в проводнике (медь) и самом диэлектрике, при этом коэффициент отражения приблизительно равен нулю. Кроме того, использование одновитковых планарных спиралей с оптимизированными параметрами и электромагнитным балансом обеспечило высокоэффективное преобразование поляризации с широкополосным низким отражением во всем исследуемом диапазоне вблизи резонансной частоты.

На рисунке 4 показана частотная зависимость коэффициента эллиптичности ( $\psi$ ) и угла поворота плоскости поляризации ( $\theta$ ) прошедшей волны для метаповерхности на исследуемой диэлектрической подложке. Данный график подтверждает вращение плоскости поляризации прошедшей волны на угол, близкий к  $90^\circ$ , и эффективность предложенных вариантов метаповерхностей для использования их в качестве пропускающего кросс-поляризатора.

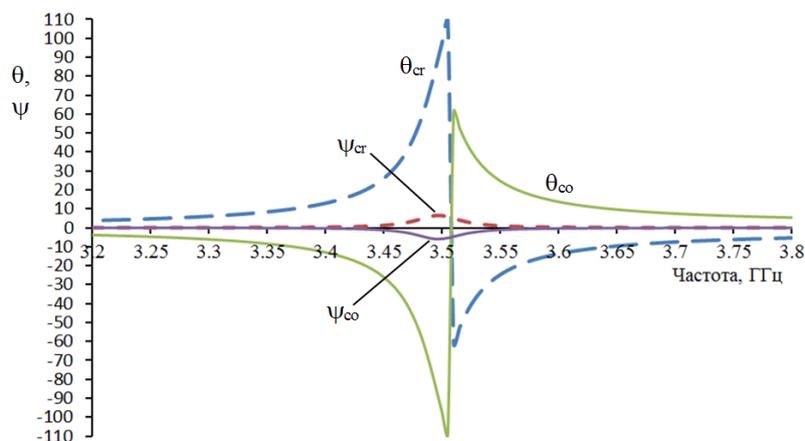


Рисунок 4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности прошедшей волны и угла поворота плоскости поляризации прошедшей волны

Преобразование линейно поляризованной падающей волны в кросс-поляризованное состояние соответствует случаю, когда эллиптичность прошедшей волны равна нулю, а её плоскость поляризации имеет угол поворота  $90^\circ$ .

**Заключение.** Проведено численное моделирование с использованием метода конечных элементов метаповерхности с найденным оптимальным расположением планарных одновитковых спиралей в решетке для получения функции кросс-поляризационного полного прохождения при отсутствии отражения и поглощения электромагнитных волн. Численный расчет структурных параметров планарной спирали и всего пропускающего кросс-поляризатора проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат и доступных в Республике Беларусь материалов. В качестве диэлектрика рассмотрен материал Taconic TLY. Для двух вариантов расположения планарных одновитковых спиралей с одинаковой киральностью в элементарной ячейке и двух диэлектриков найдены численные значения геометрических параметров метаматериала и построены графические зависимости, подтверждающие эффективность использования предложенной структуры в качестве пропускающего кросс-поляризатора. Коэффициент пропускания составил 0,8, эллиптичность не превышает  $6^\circ$ , а угол поворота плоскости поляризации составил примерно  $\theta \approx 95^\circ$ . Предлагаемая электрически тонкая метаповерхность с функцией кросс-поляризационного полного прохождения может найти применение в антенной и СВЧ технике.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф22КИТГ-021 и Ф23КИ-027.*

## Литература

1. Zhang, S. Negative refractive index in chiral metamaterials / S. Zhang [et al.] // Physical review letters. – 2009. – Vol. 102, № 2. – P. 023901.

2. Zhou, J. Negative refractive index due to chirality / J. Zhou [et al.] // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 79, № 12. – P. 121104.
3. Li, Z. Composite chiral metamaterials with negative refractive index and high values of the figure of merit / Z. Li [et al.] // *Optics express*. – 2012. – Vol. 20, № 6. – P. 6146–6156.
4. Saleh, B. E. Fundamentals of photonics / B. E. Saleh, M. C. Teich, B. E. Saleh. – New York : Wiley, 1991. – 250 p.
5. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
6. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 279 с.
7. Tarn, I. Y. A new advance in circular polarization selective surface—A three layered CPSS without vertical conductive segments / I. Y. Tarn, S. J. Chung // *IEEE transactions on antennas and propagation*. – 2007. – Vol. 55, № 2. – P. 460–467.
8. Ye, Y. 90° polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity / Y. Ye, S. He // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 96, – № 20. – P. 1–12.
9. Doumanis, E. Anisotropic impedance surfaces for linear to circular polarization conversion / E. Doumanis [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2011. – Vol. 60, № 1. – P. 212–219.
10. Plum, E. Optical activity in extrinsically chiral metamaterial / E. Plum, V. A. Fedotov, N. I. Zheludev // *Applied physics letters*. – 2008. – Vol. 93, № 19. – P. 1–16.
11. Niemi, T. Synthesis of polarization transformers / T. Niemi, A. O. Karilainen, S. A. Tretyakov // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2013. – Vol. 61, № 6. – P. 3102–3111.
12. Euler, M. RCS control using cascaded circularly polarized frequency selective surfaces and an AMC structure as a switchable twist polarizer / M. Euler, V. F. Fusco // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2010. – Vol. 52, № 3. – P. 577–580.
13. Li, T. Q. Magnetic resonance hybridization and optical activity of microwaves in a chiral metamaterial / T. Q. Li [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92, № 13. – P. 131111–131111-3.
14. Plum, E. Metamaterial with negative index due to chirality / E. Plum [et al.] // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 79, № 3. – P. 035407.
15. Song, K. 90° polarization rotator with rotation angle independent of substrate permittivity and incident angles using a composite chiral metamaterial / K. Song [et al.] // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, № 6. – P. 7439–7446.
16. Semchenko, I. V. Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of  $\Omega$  elements / I. V. Semchenko [et al.] // *J. Commun. Technol. Electron*. – 2007. – Vol. 52. – P. 1002–1005.
17. Semchenko, I. V. Artificial uniaxial bianisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Electromagnetics*. – 2002. – Vol. 22 (1). – P. 71–84.
18. Semchenko, I. V. Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties / I. V. Semchenko [et al.] // *Electromagnetics*. – 2001. – Vol. 21 (5). – P. 401–414.
19. Mutlu, M. A transparent 90 polarization rotator by combining chirality and electromagnetic wave tunneling / M. Mutlu, E. Ozbay // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 100, № 5. – DOI : 10.1063/1.3682591.
20. Semchenko, I. V. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2007. – Vol. 52, № 8. – P. 850–855.
21. Asadchy, V. S. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy [et al.] // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2014. – V. 12, № 4. – P. 298–304.
22. Faniayeu, I. Polarization control with helical metasurfaces / I. Faniayeu, V. Asadchy, I. Fanyayev // *Crystals*. – 2020. – Vol. 10, № 9. – P. 726.
23. Cuesta, F. S. Planar broadband Huygens metasurfaces for wave manipulations / F. S. Cuesta // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>БелНИПИнефть, ПО Белоруснефть

<sup>3</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Поступила в редакцию 31.10.2023

## Термохимическая обработка алмаза движущимся лазерным источником

Е.Б. ШЕРШНЁВ

Разработана нестационарная нелинейная модель процесса лазерной термохимической обработки алмаза движущимся тепловым источником. Получены распределения температуры и рассчитаны значения диффузионных коэффициентов углерода в трёхфазной системе «водород–металл–алмаз» как на поверхности раздела фаз, так и в объёме материала в диапазоне плотностей мощности гауссова теплового источника  $q = 10^6 - 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, скорости сканирования лазерным лучом поверхности  $v = 10^{-2} - 10^{-5}$  м/с для толщины металлического покрытия до 1 мкм.

**Ключевые слова:** фаза, термохимическая обработка, алмаз, лазер, температура.

A non-stationary nonlinear model of the process of laser thermochemical treatment of a diffuser with moving thermal sound has been developed. Obtaining the temperature distribution and the calculated value of the diffusion coefficients is possible in the complex phase system «hydrogen–metal–diamond», both at the interface and in the bulk material in the power densities of the Gaussian heat source  $q = 10^6 - 10^{10}$  W/m<sup>2</sup>, the speed of the intense laser surface beam  $v = 10^{-2} - 10^{-4}$  m/s for metal coating thickness up to 1 μm.

**Keywords:** phase, thermochemical treatment, diamond, laser, temperature.

**Введение.** Обработка алмазов (в том числе синтетических, например, алмазот) в технологиях микро- и наноэлектроники ведётся как ресурсоёмким механическим способом, так и с использованием лазерного излучения. При традиционном применении лазерного излучения для размерной обработки алмазного сырья (лазерная резка, гравировка, маркировка и т. п.) первоначально проводится графитизация обрабатываемой поверхности, с последующим удалением материала по заданной траектории обработки [1]. В любом случае неизбежны потери алмазного материала, связанные с выносом мелкой алмазной крошки из зоны обработки, не говоря об экологических аспектах.

В этом смысле особенным и наиболее перспективным является термохимический способ обработки алмаза. Этот способ основан на каталитических свойствах металлических покрытий предварительно нанесённых на поверхность алмаза [2]. В качестве материала для таких покрытий используют металлы, способные накапливать в своём объёме атомы углерода до определённой концентрации. Чтобы процесс растворения углерода в металле (например, молибдене) не прекращался, такие химические превращения проводят в атмосфере водорода (водяного пара, углекислого газа), который не взаимодействует непосредственно с алмазом, но способен создавать с атомами углерода, уже растворёнными в металле, летучие соединения [3]. Это значит, что углерод из структуры алмаза можно извлекать «бесконтактным» образом, а для интенсификации описанных химических превращений в выбранной зоне обработки использовать активирующее тепловое действие лазерного излучения [3], [4].

**Постановка задачи.** Для выбора оптимальных режимов лазерного термохимического способа размерной обработки алмазов необходимо исследовать физико-химические механизмы протекающих тепловых и диффузионных процессов. Для реализации движущегося теплового источника на границе раздела фаз «металл–алмаз» в процессе размерной термохимической обработки используется сканирующий лазерный луч [4]. Схема метода термохимической обработки представлена на рисунке 1.

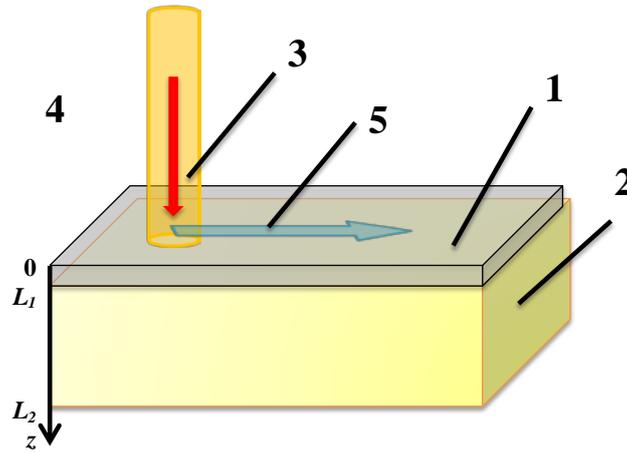


Рисунок 1 – Схема лазерной термохимической обработки алмаза при сканировании поверхности лазерным лучом: 1 – металл; 2 – алмаз; 3 – лазерное излучение; 4 – газовая среда, 5 – направление сканирования поверхности лазерным лучом

Повысить эффективность лазерной термохимической обработки можно путём выбора таких параметров лазерного излучения, чтобы обеспечивался достаточный «прогрев» поверхности алмаза не только непосредственно в зоне действия излучения, но и на «следующем шаге» сканирования. В этом случае представляется возможным избежать лишних «проходов», подобрать необходимую скорость сканирования и оптимизировать шаг перехода на новую трасу сканирования, если это предусмотрено техпроцессом. Это позволяет существенно сократить время размерной обработки поверхности по заданному контуру.

Для оптимизации процессов лазерной термохимической обработки алмазов первостепенную роль играет информация о температурных полях, формируемых в обрабатываемых лучом лазера образцах [5], [6]. Для расчёта температурного поля необходимо решить смешанную нелинейную краевую задачу теплопроводности в декартовой системе координат (см. рисунок 2), где вектор скорости движения зоны лазерного воздействия направлен вдоль оси  $x$ , для гауссова распределения энергии лазерного пучка в пространстве [7], [8]:

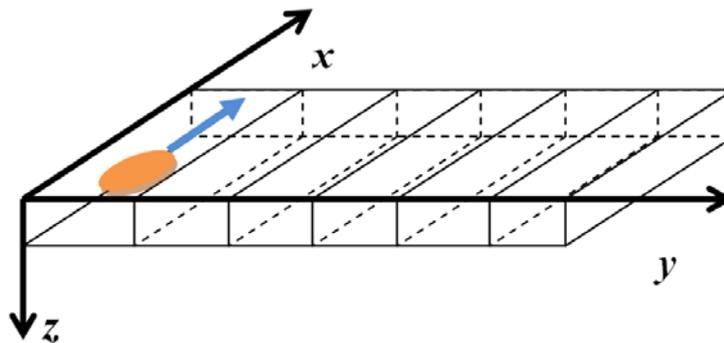


Рисунок 2 – Графическая схема модели с движущимся тепловым источником

Систему дифференциальных уравнений в таком случае для двухслойной среды «металл-алмаз» можно представить следующим образом:

$$\frac{c_1(T_1) \cdot \rho_1}{\lambda_1(T_1)} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\frac{c_2(T_2) \cdot \rho_2}{\lambda_2(T_2)} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \tau} - \frac{v_x \cdot c_2(T_2) \cdot \rho_2}{\lambda_2(T_2)} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}. \quad (2)$$

В формулах: индекс «1» – область металлического покрытия, «2» – алмазная подложка, соответственно;  $c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  – теплоёмкость, плотность и теплопроводность материалов, зависящие от соответствующей температуры  $T_i$ ,  $\tau$  – системное время.

Граничные условия II рода на границах «водород–металл» и «водород–алмаз» соответствуют наличию источника в первом случае и теплоизоляции во втором:

$$z = 0: \lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} = q \cdot e^{-\alpha \cdot R_0^2}, \quad (3)$$

$$z = L_2: \lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

где  $R_0$  – радиус лазерного пятна на поверхности металла,  $L_2$  – координата нижней границы раздела «алмаз – водород» (см. рисунок 1),  $q$  – плотность мощности теплового источника,  $\alpha$  – коэффициент сосредоточенности в показателе экспоненты функции Гаусса.

Граничные условия IV рода на границе раздела фаз «металл–алмаз», координата которой  $z = L_1$ , отражают неразрывность теплового потока:

$$z = L_1: \lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z}. \quad (5)$$

При этом будем полагать, что конвективный теплообмен с газовой фазой отсутствует в силу его существенной малости [9], а газ поддерживается при постоянной температуре  $T_0$ , значение которой и определяет начальные условия для всех частей системы. Кроме того, диапазон возможных температур ограничен температурой плавления металла при нормальных условиях, а давление в газовой фазе соизмеримо с нормальным атмосферным и не превышает его. Эти ограничения не противоречат условию достаточного нагрева металлического слоя и его насыщению углеродом, и, как следствие, не препятствуют активации диффузионных процессов на обеих границах фаз: «металл–алмаз» и «водород–металл».

Полученные в результате решения системы (1)–(5) значения температур можно использовать как аргументы для системы дифференциальных уравнений диффузии Фика в рамках заданных интервалов времени.

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_i(T_i) \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y_i} \left( D_i(T_i) \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y_i} \right) + \frac{\partial}{\partial z_i} \left( D_i(T_i) \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z_i} \right), \quad (6)$$

где  $C$  – массовая концентрация углерода каждой из трёх рассматриваемых фаз ( $i = 1, 2, 3$ ), при этом коэффициенты диффузии  $D_i$  принимаются зависящими от температуры согласно уравнению Аррениуса:

$$D_i(T_i) = D_{0i} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{k \cdot T_i}\right), \quad (7)$$

где  $D_{0i}$  – факторы диффузии, зависящие от природы материала,  $E_i$  – соответствующая  $i$ -й среде энергия активации реакции диссоциации (ассоциации) углерода,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Будет полагать, что в начальный момент времени заданы значения массовых концентраций углерода во всех трёх фазах:

$$\tau = 0: C_1 = C_{01}; C_2 = C_{02}; C_3 = C_{03} \quad (8)$$

При этом на границах фаз  $z = 0$  и  $z = L_1$  должны быть реализованы условия неразрывности потока массы:

$$D(T)_i \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} = D(T)_j \cdot \frac{\partial C_j}{\partial x}. \quad (9)$$

**Результаты моделирования и их интерпретация.** Для дифференциальной задачи теплопроводности в форме (1)–(5) возможно получить решение в квадратурах, как это представлено, например, в [7]. Но в указанном интегральном представлении такое решение является громоздким и крайне неудобным для анализа реальных систем. Поэтому реализуем переход от неподвижной системы координат к «движущейся» как это представлено в [5], [8], [9]. Это значит, что координата  $x$  будет переопределяться в каждый момент времени, в соответствии со скоростью сканирования  $v$ . Такой подход позволит получать значения температуры в любых точках системы в виде суперпозиции тепловых влияний в разные моменты времени. При этом учет граничных условий (4) и (5) в силу небольшой толщины металлического слоя можно аппроксимировать неявной конечно-разностной схемой [10].

Поскольку теплофизические свойства алмаза существенно изменяются в исследуемых температурных режимах, то это было учтено в линейном приближении следующим образом [11]: коэффициент теплопроводности  $\lambda(T) = 628 - 0,148 \cdot T$  Вт/(м·К) и удельная теплоёмкость  $c(T) = 344 + 1,445 \cdot T$  Дж/(кг·К).

Описанную задачу можно решить итерационным методом [9] и записать решение в первом приближении:

$$T = T_0 + \frac{q \cdot \sqrt{\alpha(T)}}{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \alpha \cdot \lambda(T)} \cdot F(x_n - v_x \cdot \tau, y_n, z, \tau), \quad (10)$$

$$F(x_n - v_x \cdot \tau, y_n, z, \tau) = \int_0^\tau \exp \left\{ - \frac{y_n^2 + (x_n - \omega \cdot v_x)^2}{4 \cdot \left[ \alpha(T) \cdot (\tau - \omega) + \frac{1}{4 \cdot \alpha} \right]} - \frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - \omega)} \right\} \times \frac{d\omega}{\left[ \alpha(T) \cdot (\tau - \omega) + \frac{1}{4 \cdot \alpha} \right] \cdot \sqrt{\tau - \omega}} \cdot (11)$$

В среде Mathcad были разработаны файлы-сценарии для динамического моделирования температурного поля представленной трёхмерной нестационарной нелинейной модели с движущимся тепловым источником. Изменяя параметры модели (например: плотность мощности теплового источника, скорость сканирования, длину трассы, теплофизические характеристики покрытия и подложки и т. п.) в любом необходимом диапазоне, получать значения температуры и диффузионных коэффициентов в любых точках рассматриваемой трёхфазной системы, в том числе и на границах раздела фаз в любой момент времени.

На рисунке 3 представлены поля температур поверхности алмазной пластины (в координатах  $X, Y$ ) при плотности мощности теплового источника  $q = 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, распределённой по закону Гаусса, скорости сканирования  $v = 10^{-4}$  м/с, при радиуса лазерного пятна на поверхности  $R_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> в различные моменты времени воздействия лазерного излучения.

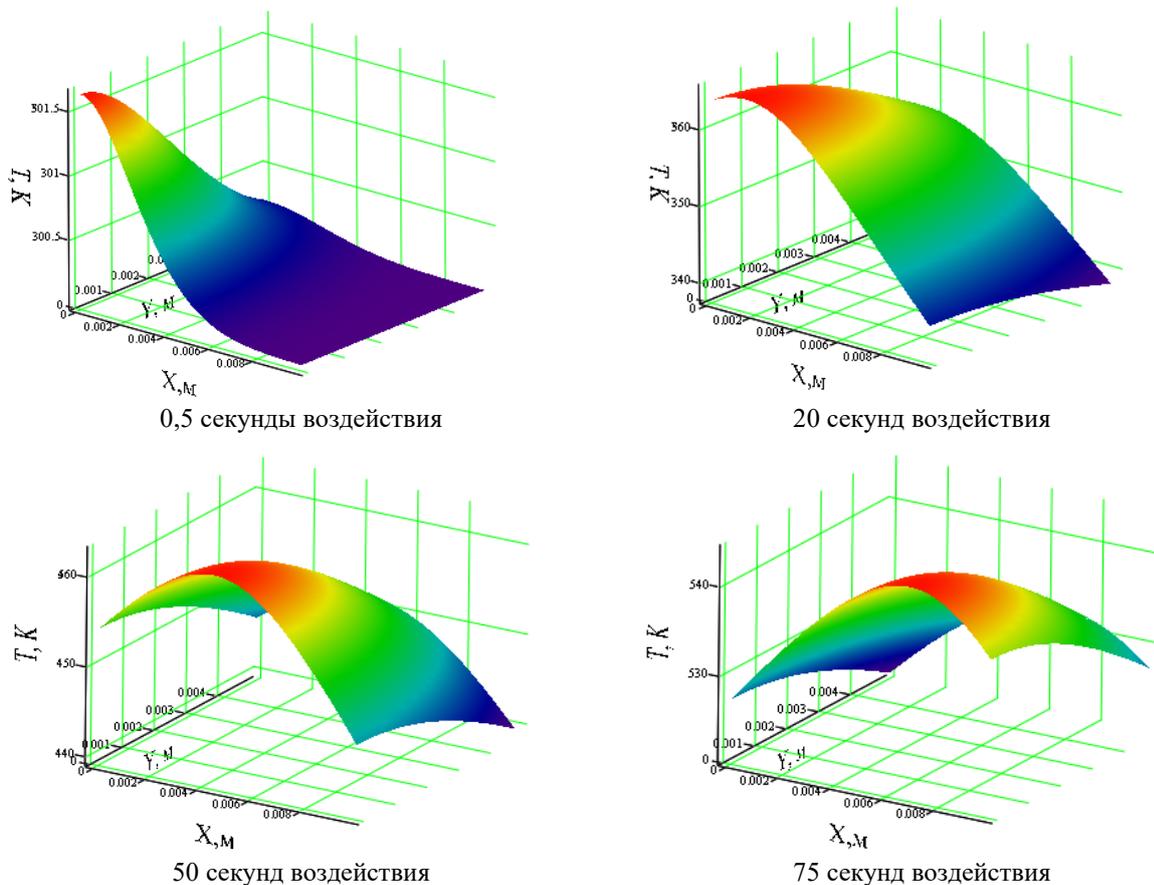


Рисунок 3 – Распределения температуры  $T$  (К) по поверхности алмазной пластины в различные моменты времени воздействия лазерного излучения в случае движения теплового источника вдоль координаты  $x$

Из представленных на рисунке 3 зависимостей видно, что температурный фронт движется вдоль координаты  $x$ , при этом увеличиваются абсолютные значения температуры как вдоль координаты  $x$ , так и вдоль координаты  $y$ . Показано, что зона термического влияния теплового источника, где наблюдаются значения температуры, отличающиеся менее чем на 70 % от пикового значения в центре лазерного пятна, составляет ( $\leq 3 \cdot R_0$ ).

На рисунке 4 представлены поля температур вертикального сечения алмазной пластины (в координатах  $X, Z$ ) при тех же значениях параметров, которые были приняты при построении графиков на рисунке 3. Показано, что при тех же режимах лазерного воздействия распространение теплоты в глубину материала (координата  $Z$ ) за счёт теплопроводности менее эффективно, чем по поверхности материала, о чём свидетельствуют более низкие (на 35–50 %) значения температуры на одинаковых расстояниях от зоны лазерного воздействия.

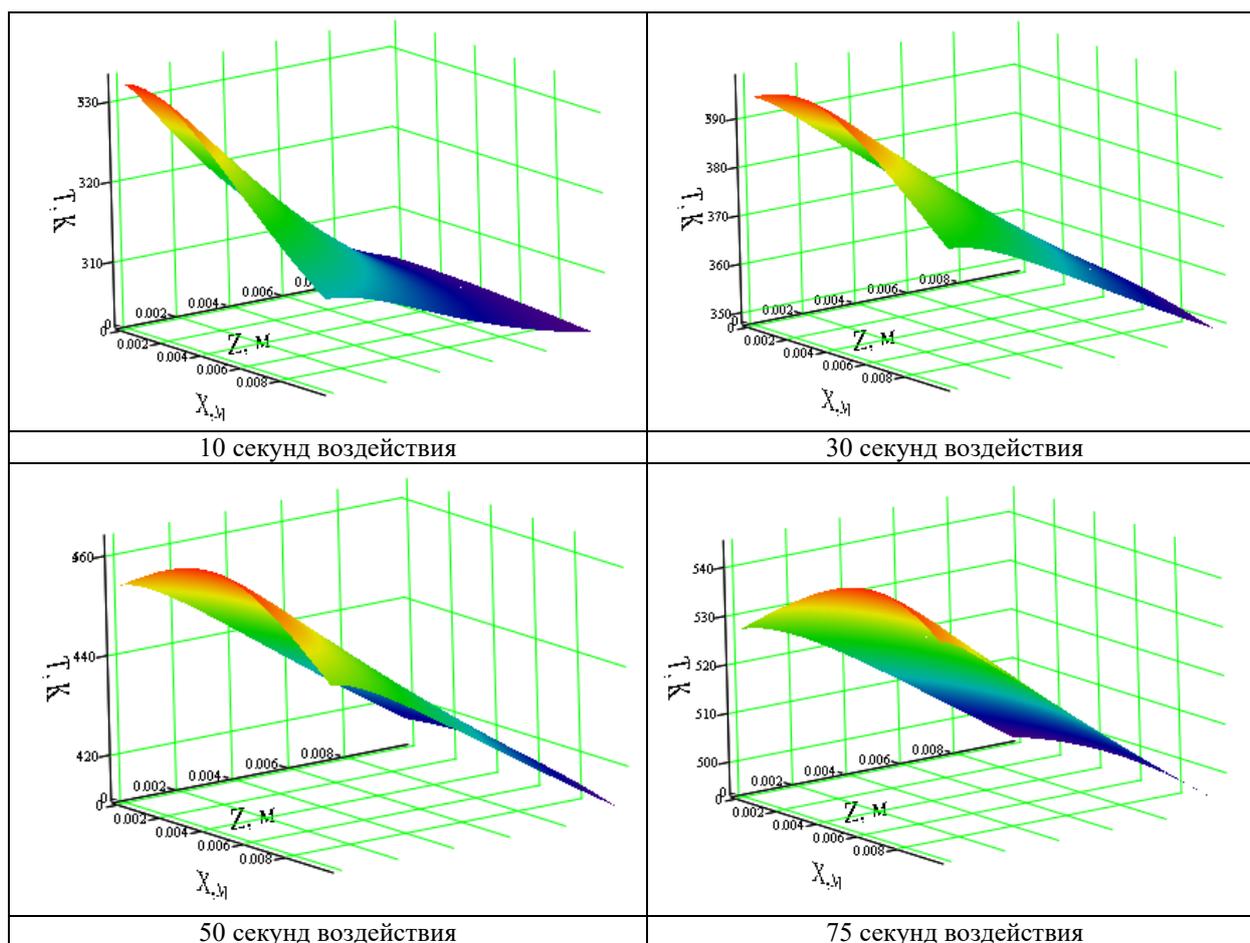


Рисунок 4 – Распределения температуры  $T$  (K) по вертикальному сечению алмазной пластины в различные моменты времени воздействия лазерного излучения в случае движения теплового источника вдоль координаты  $x$

Как уже отмечалось, в рамках данной модели практический интерес представляет исследование на основании соотношений (6)–(9) динамики диффузионных коэффициентов в различных областях исследуемой системы (см. рисунок 1) с целью количественной оценки протекающих описанных ранее термохимических процессов.

На рисунке 5 представлено распределение значений диффузионных коэффициентов  $D(T)$  на границе фаз «металл–алмаз» в различные моменты времени для режимов лазерного воздействия, соответствующих результатам моделирования температуры, представленными на рисунках 3 и 4.

Расчёт диффузионных коэффициентов показал, что в целом их динамика коррелирует с динамикой температуры, т. е. «отражает» движение теплового источника по поверхности.

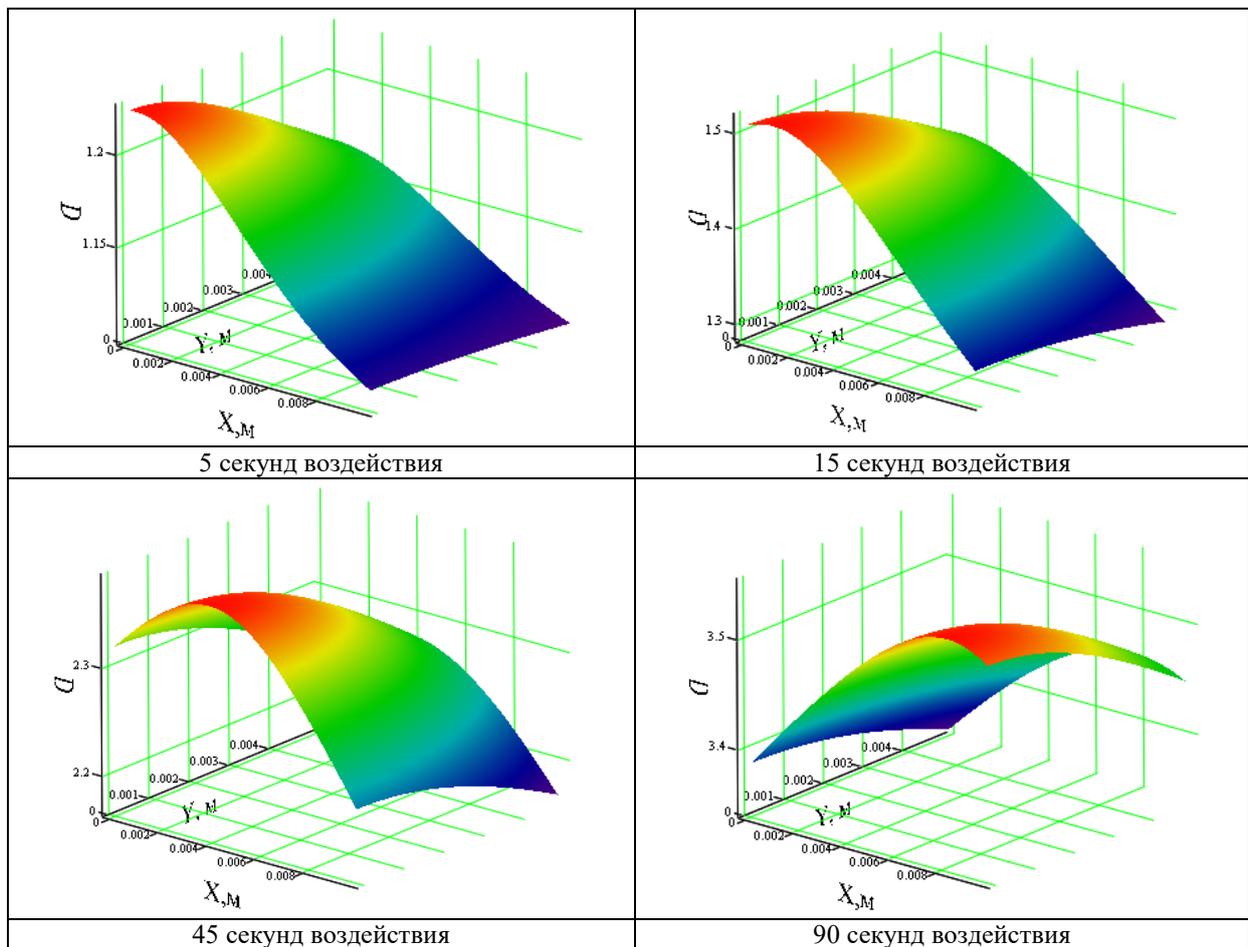


Рисунок 5 – Распределение коэффициентов диффузии  $D$  ( $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с) на поверхности раздела фаз «металл–алмаз» в случае движущегося теплового источника

При этом, при увеличении температуры поверхности в зоне термического влияния лазерного излучения ( $\leq 3 \cdot R_0$ ) до 450–500 К, от начальной  $T_0 = 300$  К, наблюдается увеличение значений диффузионных в 3–4 раза, что свидетельствует об эффективности протекающих термохимических процессов и перспективности метода лазерной размерной термохимической обработки алмазов.

**Результаты и выводы.** Результаты моделирования показали, что при уменьшении плотности мощности теплового источника  $q$  даже в пределах одного порядка диффузионные коэффициенты уменьшаются по абсолютному значению на 35–40 % по всей зоне термического влияния лазерного излучения ( $\leq 3 \cdot R_0$ ). При разменной лазерной термохимической обработке существенной становится скорость сканирования  $v$ . Анализ результатов моделирования, а именно: значений коэффициентов диффузии и соответствующей им интенсивности термохимических процессов, показывает, что в диапазоне плотностей мощности  $q = 10^7 - 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> и толщине металлического покрытия до 1 мкм оптимальная скорость сканирования составляет величину  $\approx 10^{-4}$  м/с. Такие режимы обеспечивают оптимальный «прогрев» границы раздела фаз «металл–алмаз», позволяют контролировать динамику диффузионных коэффициентов  $D$ , что в целом повышает управляемость исследуемого процесса.

### Литература

1. Митягин, А. Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной техники / А. Ю. Митягин, А. А. Алтухов, А. Б. Митягина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 1. – С. 53–58.
2. Григорьев, А. П. Механизм гидрирования углерода в присутствии никеля, железа и платины / А. П. Григорьев, С. У. Лифшиц, П. П. Шамаев // Кинетика и катализ. – 1977. – Т. 18, № 4. – С. 948–952.

3. Емельянов В. А. Изучение влияния параметров обработки на протекание поверхностных нанопроцессов при формообразовании синтетических алмазов / В. А. Емельянов [и др.] // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2021. – №. 6. – С. 159.
4. Емельянов, В. А. Термохимическая лазерная обработка монокристаллов алмаза / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, А. Н. Купо, С. И. Соколов // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 22–26 ноября 2021 г. / БГУ, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Минск : БГУ, 2021. – С. 382–385.
5. Хмыль, А. А. Оптимизация процессов лазерной резки алмазов на основании результатов математического моделирования / А. А. Хмыль, А. Н. Купо, А. Е. Шершнев // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 153–157.
6. Емельянов, В. А. Моделирование температурного поля и расчет механических напряжений при двухлучевом лазерном управляемом термораскалывании кварцевого стекла / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, А. Н. Купо // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19 (7). – С. 80–88.
7. Углов, А. А. К расчету температурных полей от движущихся концентрированных источников энергии / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, С. С. Андриянов // Физика и химия обработки материалов – 1981. – № 1. – С. 35–41.
8. Абрамов, О. В. К расчёту тепловых полей при сканировании источника энергии / О. В. Абрамов, А. П. Гуськов, С. Ф. Морящев, С. С. Черепнёв // Физика и химия обработки материалов – 1987. – № 2. – С. 64–68.
9. Прохоров, А. М. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров [и др.]. – Бухарест : Academiei ; М. : Наука, 1988. – 537 с.
10. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности : учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
11. Физические свойства алмаза. Справочник / под. ред. академика АН УССР Н. В. Новикова – Минск : «Навукова думка», 1987. – 188 с.

## Краткие сообщения

УДК: 57.063:599.742.75(476.2)

EDN: CGUMWB

### О находке черепа рыси (*Lynx lynx*) в Буда-Кошелёвском районе Гомельской области

А.М. ОСТРОВСКИЙ

Приведены сведения о находке черепа рыси (*Lynx lynx*) на территории Чеботовичского лесничества Буда-Кошелёвского района Гомельской области. Череп животного был обнаружен 20.05.2023 на заболоченном участке хвойно-лиственного леса с густым подлеском севернее посёлка Крылов. Основные промеры черепа (кондилобазальная длина – 142,0 мм, скуловая ширина – 110,0 мм) свидетельствуют о принадлежности черепа половозрелой особи возрастом более 3 лет.

**Ключевые слова:** юго-восток Беларуси, рысь, череп, краниологические показатели.

The data on the record of lynx (*Lynx lynx*) skull on the territory of the Chebotovichi forestry of the Buda-Koshelevo district (the Gomel region) are analyzed. The skull of the animal was found on 20.05.2023 in a swampy area of coniferous-deciduous forest with dense undergrowth north of the Krylov village. The main measurements of the skull (condylobasal length – 142,0 mm, zygomatic breadth – 110,0 mm), indicate that the skull belonged to a sexually mature individual over 3 years old.

**Keywords:** south-east of Belarus, lynx, skull, craniological indicators.

**Введение.** Рысь обыкновенная *Lynx lynx* (Linnaeus, 1758) – крупный вид семейства кошачьих (Felidae) отряда хищных млекопитающих (Carnivora), редкий представитель териофауны Беларуси, находящийся на южной границе ареала [1]. Занесен в Красную книгу Республики Беларусь (2015). Статус – II категория национальной природоохранной значимости [2]. Является охраняемым животным и на территории Литвы, Польши, Украины и Брянской области Российской Федерации [3]–[6]. Этот аборигенный вид кошачьих встречается практически на всей территории Беларуси, но неравномерно: на севере и юго-востоке отмечается практически сплошное распространение рыси, тогда как в центральной и юго-западной частях республики характер её распространения мелкоочаговый [7].

В этой связи новые находки важны для оценки современного распространения и численности данного вида на территории Беларуси.

**Цель работы** – внести дополнение в места обитания рыси в Буда-Кошелёвском районе Гомельской области.

**Результаты и обсуждение.** Череп животного был обнаружен 20.05.2023 г. на заболоченном участке хвойно-лиственного леса с густым подлеском на территории Чеботовичского лесничества (7 квартал) в 2 км севернее посёлка Крылов (52°36'57"N, 30°17'28"E).

В найденном остеологическом материале отсутствовали нижняя челюсть, верхние резцы, клыки и последняя пара коренных зубов (рисунок 1).

Краниометрические показатели получали общепринятыми методами [8]. Промеры черепа измерялись с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм.

Основные промеры: общая длина черепа – 158,0 мм, кондилобазальная длина черепа – 142,0 мм, длина костного нёба – 64,0 мм, альвеолярная длина верхнего ряда зубов – 62,0 мм, ширина носового отдела – 42,8 мм, скуловая ширина – 110,0 мм, затылочная ширина – 66,3 мм, межглазничная ширина – 36,0 мм.

Анализ указанных характеристик в сравнении с данными других исследователей [9]–[11] позволяет утверждать, что найденный череп принадлежит половозрелой особи возрастом более 3 лет.

В анализируемом черепе грубых патоморфологических изменений не выявлено. Внутри свода черепа отсутствуют и массивные кальцификаты. Пулевых отверстий не обнаружено, что не исключает вероятность убийства рыси браконьерами.



А



Б



В

Рисунок 1 – Череп рыси обыкновенной:

А – латеральная сторона, Б – дорзальная сторона, В – вентральная сторона

**Заключение.** Данная находка подтверждает обитание рыси на территории Буда-Кошелёвского района Гомельской области. Найденный череп принадлежит взрослой особи. Патологии в черепе отсутствуют. Точно установить причину гибели невозможно.

Рысь является высокоспециализированным хищником, играющим важную роль в лесных экосистемах, в связи с чем заслуживает особого внимания в рамках реализации природоохранных мероприятий и мониторинговых исследований. В этих исследованиях одним из методов может быть анализ найденного остеологического материала.

Автор благодарит доцента А.А. Саварина (ГГУ им. Ф. Скорины) за оказанную консультативную помощь.

## Литература

1. Савицкий, Б. П. Млекопитающие Беларуси / Б. П. Савицкий, С. В. Кучмель, Л. Д. Бурко; под общ. ред. Б. П. Савицкого. – Минск : БГУ, 2005. – 319 с.
2. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды ; гл. редкол.: И. М. Качановский (предс.), М. Е. Никифоров, В. И. Парфенов [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2015. – 320 с.
3. Lietuvos raudonoji knyga. Gyvūnai, augalai, grybai / Aplinkos ministerija ; vyr. red.: V. Rašomavičius (chief), L. Balčiauskas, E. Budrys [ir kt.]. – Vilnius : Lututė, 2021. – 683 p.
4. Czerwona lista zwierząt ginących i zagrożonych w Polsce / Instytut Ochrony Przyrody PAN ; zesp. red.: Z. Głowaciński (red.), M. Makomaska-Juchiewicz, G. Połczyńska-Konior. – Kraków : Poligrafia Inspektoratu Towarzystwa Salezjańskiego, 2002. – 155 s.
5. Червона книга України. Тваринний світ / Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Національна академія наук України ; редкол.: Г. Г. Філіпчук (гол.), М. М. Мовчан, І. А. Акімов [та інш.]. – Київ : Глобалконсалтинг, 2009. – 600 с.
6. Красная книга Брянской области / Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского» ; ред.: А. Д. Булохов [и др.]. – 2-е изд. – Брянск : РИО БГУ, 2016. – 432 с.
7. Соловей, И. А. Численность рыси в Беларуси на начало 2022 года / И. А. Соловей // Актуальные проблемы охраны животного мира в Беларуси и сопредельных регионах : материалы II Международной научно-практической конференции, Минск, 11–14 октября 2022 г. / ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» ; редкол.: А. В. Кулак [и др.]. – Минск : А.Н. Вараксин, 2022. – С. 442–446.
8. Казло, П. Р. Краніяметрычная характарыстыка ваўка Беларусі / П. Р. Казло, С. У. Кучмель // Весці АН БССР. – 1985. – № 6. – С. 85–89.
9. Andersen, T. Growth of the skull of Norwegian lynx / T. Andersen, Ø. Wiig // Acta theriologica. – 1984. – Vol. 29, № 8. – P. 89–110.
10. Wiig, Ø. Sexual size dimorphism in the skull of Norwegian lynx / Ø. Wiig, T. Andersen // Acta theriologica. – 1986. – Vol. 31, № 12. – P. 147–155.
11. van Bree, P.J.H. On the skull of a lynx, *Lynx lynx* (Linnaeus, 1758), found in the Roman Castellum at Valkenburg, Province of Zuid-Holland, The Netherlands / P.J.H. van Bree, A. T. Clason // Bijdragen tot de Dierkunde. – 1971. – Vol. 41, № 2. – P. 130–135.

---

Технический редактор: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *Е.Н. Ермакова, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 01.12.2023. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 15,58. Уч.-изд. л. 13,57. Тираж 25 экз. Заказ № 655.  
Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.