

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3 (150)

Естественные науки

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, член-корр. НАН Беларуси

Члены редакционной коллегии:

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

Члены редакционной коллегии по естественным наукам:

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

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

Francisk Skorina Gomel State University

PROCEEDINGS

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

Members of editorial board:

F. V. Kadol, Sc. D., Professor
V.N. Kalmykov, Sc. D., Professor
V.I. Koval, Sc. D., Professor
I.V. Semchenko, Sc. D., Professor,
Corresponding Member NASB
V.S. Smorodin, Sc. D., Professor
V.M. Homich, Sc. D., Professor
O.G. 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,
Corresponding Member RAS
V.V. Mozharovsky, Sc. D., Professor
A.N. Serdukov, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A.N. Skiba, Sc. D., Professor
Shen Riku (China), Sc. D., Professor
R. Esteban Romero (Spain), Sc. D., Professor

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

© Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», 2025
© Educational Establishment «Francisk Skorina Gomel State
University», 2025

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2025, № 3 (150) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Болсун И.М. Распространение лихенофильного гриба <i>Lichenostigma maureri</i> (<i>Lichenostigmatales</i> , <i>Phaeococcomycetaceae</i>) в Беларуси.....	5
Гончаренко Г.Г., Зятков С.А., Крук А.В. Генетический полиморфизм микросателлитного локуса <i>B-100</i> в популяциях шмелей <i>Bombus terrestris</i> L.	11
Гулаков А.В., Дроздов Д.Н., Иванцов Д.Н. Оценка доз внутреннего облучения ихтиофауны Полесского государственного радиационно-экологического заповедника	15
Карпенко А.Ф., Царенок А.А. Влияние витамина D и кальция в рационе на поступление стронция-90 в молоко на территории радиоактивного загрязнения	20
Концевая И.И., Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Дайнеко Д.В. Влияние биопрепарата Грамисил в посевах озимого ячменя на агрономически ценные группы почвенных микроорганизмов.....	25
Крицкая А.Н. Видовой состав и таксономическая структура ассамблей жуужелиц (<i>Coleoptera</i> , <i>Carabidae</i>) отвалов фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод»	32
Лазарева М.С., Булавкина И.А., Климович Л.К. Возобновление дуба в производных березовых насаждениях южной части Беларуси	37
Сушко Г.Г., Стальмах А.В., Ткаченко А.С., Литвенкова И.А., Лакотко А.А. Изоляция как фактор изменчивости морфометрических признаков и биомассы жуужелицы садовой (<i>Carabus hortensis</i> Linnaeus, 1758)	43
Тимофеев С.Ф., Карпенко Н.И. Особенности аккумуляции ¹³⁷ Cs почвенно-растительным покровом пойменного луга р. Сож	50
Храмченкова О.М. Разработка биологически активных композиций с антиоксидантными и фотозащитными свойствами на основе экстрактов из лесных лишайников.....	56

ИНФОРМАТИКА

Воруев А.В., Голубич К.С., Сыч Д.С., Рафалова Е.В. Эффективность расчёта и трудности при расчете расстояния до обозреваемого с использованием системы с одной камерой без калибровки	62
Рябичина О.П., Ходасевич О.Р. Использование технологий искусственного интеллекта для автоматизированной оценки знаний	67
Сукач Е.И., Кончиц А.П., Громыко Р.Ю. Получение и мониторинг метеоданных в реальном времени с использованием ESP-32	73

МАТЕМАТИКА

Бородич Р.В., Бородич Е.Н., Бузланов А.В., Близнец И.В. <i>О пересечении подгрупп близких к $\mathcal{F}$-абнормальным</i>	77
Бругтан Ю.В., Гайшун В.Е., Косенок Я.А., Марченко Л.Н. <i>Нейро-нечеткая модель динамической вязкости водных суспензий на основе наноразмерных частиц диоксида кремния</i>	84
Ленденкова С.И. <i>О конечных группах, факторизуемых слабо перестановочными подгруппами</i>	90
Можаровский В.В., Киргинцева С.В. <i>Определение скорости волны при гидроударе в двухслойных ортотропных трубах</i>	95
Хайан Ли, Ефимов К.С., Махнёв А.А. <i>Дистанционно регулярный граф с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ не существует</i>	100

ФИЗИКА

Банний В.А., Казущик А.Л., Петрова Е.С., Дерюжкова О.М. <i>Особенности изучения методов защиты от СВЧ-излучения в курсе «Медицинская и биологическая физика»</i> ..	105
---	-----

ЭЛЕКТРОНИКА

Шершнев Е.Б. <i>Практикум по основам радиоэлектроники для обучающихся инженерно-технического профиля с использованием современных средств</i>	110
Шершнев Е.Б., Купо А.Н. <i>Особенности полировки алмазов в различных кристаллографических плоскостях для изделий микроэлектроники специального назначения</i>	117

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Пугачёв М.М., Тюменков Г.Ю. <i>Комета C/2024 G3 (ATLAS): основные характеристики, специфика поведения ядра и динамика изменения звёздной величин</i>	125
Саварин А.А., Островский А.М. <i>К вопросу о краниологическом патоморфологическом мониторинге рукокрылых</i>	128

ПЕРСОНАЛИИ

Гальмак А.М., Монахов В.С., Сафонов В.Г., Скиба А.Н. <i>Полиадическое наследие Юрия Ивановича Кулаженко</i>	131
---	-----

PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2025, № 3 (150) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Bolsun I.M. Spread of the lichenophilic fungus <i>Lichenostigma maureri</i> (<i>Lichenostigmatales</i> , <i>Phaeococcomycetaceae</i>) in Belarus.....	5
Goncharenko G.G., Ziatkov S.A., Kruk A.V. Genetic polymorphism of the microsatellite locus B-100 in populations of bumblebees <i>Bombus terrestris</i> L.....	11
Gulakov A.V., Drozdov D.N., Ivantsov D.N. Estimation of internal radiation doses of ichthyofauna of the Polessky State Radiation and Ecological Reserve.....	15
Karpenko A.F., Tsarenok A.A. The effect of vitamin D and calcium in the diet on the intake of strontium-90 in milk in the territory of radioactive contamination.....	20
Kontsevaya I.I., Daineko N.M., Timofeev S.F., Daineko D.V. The influence of the Gramisil biopreparation in winter barley crops on agronomically valuable groups of soil microorganisms..	25
Kritskaya A.N. Species composition and taxonomic structure of ground beetle assemblages (<i>Coleoptera</i> , <i>Carabidae</i>) of phosphogypsum dumps of JSC Gomel Chemical Plant	32
Lazareva M.S., Bulavkina I.A., Klimovich L.K. Renewal of oak in derived birch plantations in the southern part of Belarus.....	37
Sushko G.G., Stalmah A.V., Tkachenok A.S., Litvenkova I.A., Lakotko A.A. Isolation as a factor in the variability of morphometric features and biomass of the garden ground beetle (<i>Carabus hortensis</i> Linnaeus, 1758).....	43
Timofeev S.F., Karpenko N.I. Peculiarities of ¹³⁷ Cs accumulation by soil and vegetation cover of the floodplain meadow of the Sozh River.....	50
Khramchankova V.M. Development of biologically active compositions with antioxidant and photoprotective properties based on extracts from forest lichens.....	56

INFORMATION TECHNOLOGY

Voruev A.V., Golubich K.S., Sych D.S., Rafalova E.V. Effectiveness and challenges in calculating the distance to the object under observation using a single-camera system without calibration.....	62
Riabychina O.P., Hodasevich O.P. Using artificial intelligence technologies for automated knowledge assessment.....	67
Sukach E.I., Konchits A.P., Gromyko R.Yu. Obtaining and monitoring real-time weather data using ESP-32.....	73

MATHEMATICS

Borodich R.V., Borodich E.N., Buzlanov A.V., Bliznets I.V. On the intersection of subgroups close to $\mathfrak{F}$ -abnormal	77
---	----

Bruttan Yu.V., Gaishun V.E., Kosenok Ya.A., Marchenko L.N. <i>Neuro-fuzzy model of dynamic viscosity of aqueous suspensions based on nanosized silicon dioxide particles</i>	84
Lendenkova S.I. <i>On finite groups factorized by weakly permutable subgroups</i>	90
Mozharovsky V.V., Kirgintseva S.V. <i>Calculating wave velocity during hydraulic shock in two-layer orthotropic pipes</i>	95
Xian Li, Efimov K.S., Mahnev A.A. <i>Distance-regular graph with intersection array $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ does not exist</i>	100

PHYSICS

Banny V.A., Kazuschik A.L., Petrova E.S., Deriuzhkova O.M. <i>Features of studying methods of protection from microwave radiation in the course «Medical and Biological Physics»</i>	105
--	-----

ELECTRONICS

Shershnev E.B. <i>Workshop on the fundamentals of radio electronics for students of engineering and technical profile using modern virtualization tools</i>	110
Shershnev E.B., Kupo A.N. <i>Features of diamond polishing in various crystallographic planes for special-purpose microelectronic devices</i>	117

ABSTRACTS

Pugachev M.M., Tyumenkov G.Yu. <i>Comet C/2024 G3 (ATLAS): main characteristics, specific behavior of the nucleus and dynamics of changes in magnitude</i>	125
Savarin A.A., Ostrovsky A.M. <i>On the problem of craniological pathomorphological monitoring of bats</i>	128

PERSONALITY

Galmak A.M., Monahov V.S., Safonov V.G., Skiba A.N. <i>The polyadic legacy of Yuri Ivanovich Kulazhenko</i>	131
---	-----

Распространение лихенофильного гриба *Lichenostigma maureri* (*Lichenostigmatales*, *Phaeococcomycetaceae*) в Беларуси

И.М. Болсун

В ходе ревизии 626 гербарных образцов лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* Беларуси было выявлено 14 образцов лишайников рода *Bryoria* и 115 образцов лишайников рода *Usnea*, на слоевищах которых был обнаружен лихенофильный гриб *Lichenostigma maureri*. Согласно литературным данным *Lichenostigma maureri* имеет ограниченное распространение на территории Беларуси, встречаясь преимущественно в пределах особо охраняемых природных территорий. Наши исследования показали, что *Lichenostigma maureri* является обычным видом на территории Беларуси, встречаясь преимущественно в северо-западных регионах страны, что отражает выявленное ранее распространение лишайников-хозяев.

Ключевые слова: биоразнообразие, лишайники, лихенофильный гриб, распространение, встречаемость.

During the revision of 626 herbarium specimens of lichen genera *Bryoria* and *Usnea* in Belarus, 14 *Bryoria* specimens and 115 *Usnea* specimens infected with lichenicolous fungus *Lichenostigma maureri* were identified. According to the literature, *Lichenostigma maureri* has a limited distribution on the territory of Belarus, occurring mainly within specially protected natural territories. Our research has revealed that *Lichenostigma maureri* is a common species in Belarus, being confined mainly to the northwestern regions of the country, which reflects the previously identified distribution of lichen hosts.

Keywords: biodiversity, lichens, lichenicolous fungus, distribution, occurrence.

Введение. Лихенофильные грибы обитают исключительно на лишайниках, чаще всего как облигатные паразиты, но также и как патогены широкого спектра действия, сапротрофы или комменсалы [1]. В настоящее время число признанных лихенофильных грибов составляет более 2300 таксонов различных классов отделов Ascomycota и Basidiomycota [2].

Согласно литературным данным, вид *Lichenostigma maureri* Hafellner (ранее приводился как *Phaeosporobolus usneae* D. Hawksw. & Hafellner [3]) имеет ограниченное распространение на территории Беларуси, встречаясь преимущественно в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ), в частности Березинского биосферного заповедника, национальных парков (НП) «Беловежская пуща» и «Припятский» [4].

В ходе ревизии лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* Беларуси [5]–[8] нами были выявлены образцы, пораженные *Lichenostigma maureri*. В связи с этим представляется актуальным оценить распространение данного лихенофильного гриба на территории страны.

Материал и методы исследования. Материалом для данного исследования послужили образцы лишайников родов *Bryoria* и *Usnea*, хранящиеся в гербариях Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины (GSU), Института экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича НАН Беларуси (MSK-L), Центрального ботанического сада НАН Беларуси (MSKH), Белорусского государственного университета (MSKU) и Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН (LE). Всего было проанализировано 745 гербарных образцов лишайников родов *Bryoria* и *Usnea* (207 и 538 образцов, соответственно) сборов 1924–2018 гг. Дублетные сборы, хранящиеся в разных гербариях, принимали за один гербарный образец. Общее количество образцов без учета дублетного материала составило 626 гербарных конвертов (163 образца рода *Bryoria* и 463 образца рода *Usnea*).

Морфологию образцов изучали с помощью стереомикроскопа Nikon SMZ-745, анатомию – с помощью микроскопа Nikon Eclipse 80i, состав вторичных метаболитов лишайников-хозяев – с помощью метода тонкослойной хроматографии в системе растворителей С [9].

Результаты и их обсуждение. В ходе проведённого исследования было выявлено 129 образцов *Lichenostigma maureri*, 115 из которых были отмечены на лишайниках рода *Usnea* (24,8 % от общего числа просмотренных образцов данного рода) и 14 – на лишайниках рода *Bryoria* (8,6 % от общего числа просмотренных образцов данного рода).

Лихенофильный гриб обладает мультирегиональным ареалом, встречаясь на территории Европы, Азии, Северной и Южной Америки, Австралии, Океании и Антарктиды [10]. Наши исследования показали, что на территории Беларуси *Lichenostigma maureri* встречается достаточно часто (рисунок 1). Наибольшее количество локалитетов отмечено в северо-западных регионах страны, что отражает выявленную ранее встречаемость лишайников-хозяев [5]–[8].

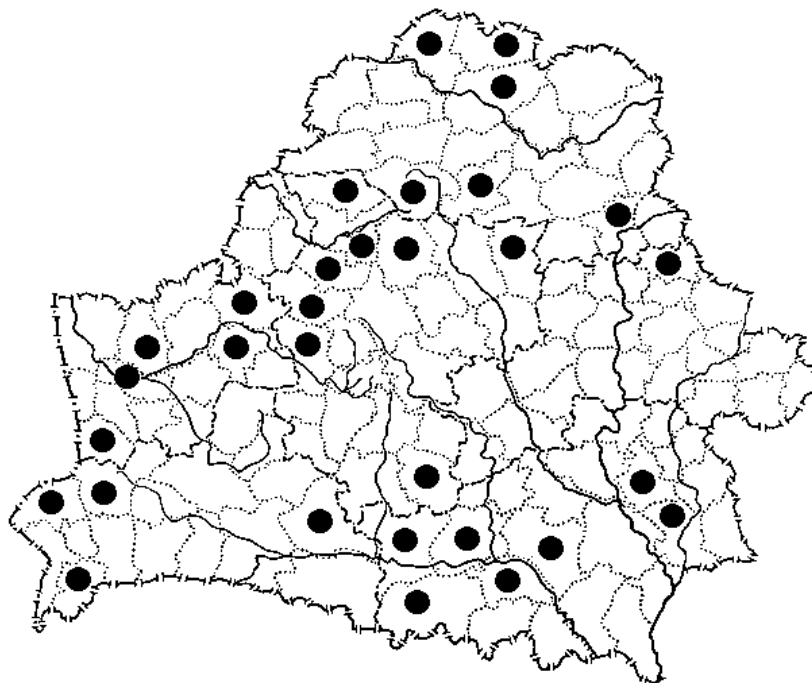


Рисунок 1 – Распространение *Lichenostigma maureri* на территории Беларуси

Ниже приводим перечень изученных образцов.

БРЕСТСКАЯ ОБЛАСТЬ, Каменецкий район, НП «Беловежская пуща», Королёво-Мостовское л-во, кв. 727, в ельнике кисличном на *Usnea hirta* на ели, П.Н. Белый, 17.10.2009 (GSU-2223); то же л-во, кв. 740, выд. 38, в ельнике кисличном на *U. dasopoga* на ели, П.Н. Белый, 17.10.2009 (GSU-2224); то же л-во, кв. 780, в ельнике кисличном на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 16.10.2009 (GSU-2225); тот же кв., выд. 14, в ельнике кисличном на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 16.10.2009 (GSU-2226); то же л-во, кв. 804, у дороги на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 12.07.1983 (GSU-2227); то же л-во, кв. 824, 2 км ЮЗ д. Каменюки, в черноольшанике крапивном на *U. hirta* на ольхе чёрной, В.В. Голубков, 16.06.1983 (GSU-2228); то же л-во, кв. 824, около главного входа в НП, на *U. dasopoga* на клёне псевдоплатановом, В.В. Голубков, А.Г. Цуриков, 07.08.2018 (GSU-2229); **Лунинецкий район,** г.п. Микашевичи, в сосняке вересковом на *U. dasopoga* на берёзе, А.П. Яцына (GSU-2230); окр. д. Дятловичи, на *Bryoria vrangiana* на заборе, Н.В. Кацуба, 25.08.1999 (GSU-2231); **Малоритский район,** 6 км СВ д. Леховцы, в сосняке мшистом на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 20.09.1984 (GSU-2232); **Пружанский район,** НП «Беловежская пуща», окр. д. Переров, на *U. glabrescens* var. *fulvoreagens* на ели, Н.В. Горбач, 09.06.1960 (GSU-2233); окр. д. Лососин, Пружанское л-во, кв. 3, на *U. hirta* на сосне, 06.09.2001 (GSU-2234); шоссе Пружаны, в сосняке вересковом на *U. hirta* на сосне, Е.Е. Блудов, 13.05.1977 (GSU-2235); НП «Беловежская пуща», Никорское л-во, кв. 560, в черноольшанике касатиковом на *U. dasopoga* на ольхе чёрной, В.В. Голубков, 25.07.1983 (GSU-2236); то же л-во, кв. 562, 1,5 км ЮВ д. Бабинiec, в дуб-

раве грабово-кисличной на *U. hirta* на пихте белой, В.В. Голубков, 29.07.1983 (GSU-2237); НП «Беловежская пуща», Переровское л-во, кв. 21, в пойменной дубраве (грабово-лещинной) на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 26.08.1982 (GSU-2238); то же л-во, кв. 712, 4 км. 3 д. Вискули, зубропитомник, в осветлённой дубраве на *B. vrangiana* на дубе, В.В. Голубков, 20.06.1983 (GSU-2239); то же л-во, кв. 589, в дубраве грабово-кисличной на *U. dasopoga* на дубе, В.В. Голубков, 13.07.1983 (GSU-2240); то же л-во, кв. 589, 500 м В хут. Перерово, в дубраве грабово-кисличной на *U. dasopoga* на дубе, В.В. Голубков, 15.07.1983 (GSU-2241); то же л-во, кв. 590, 1 км 3 хут. Перерово, в дубраве кисличной на *U. dasopoga* на дубе, В.В. Голубков, 25.07.1983 (GSU-2242); то же л-во, кв. 591, в дубраве чернично-кисличной на *U. glabrescens* var. *glabrescens* на дубе, 28.07.1983 (GSU-2243); **ВИТЕБСКАЯ ОБЛАСТЬ, Верхнедвинский район**, 3 км ЮВ д. Прошки, в ельнике чернично-лишайниковом на *U. hirta* на ели, 16.06.1986 (GSU-2244); 3 км ЮВ д. Прошки, дорога Игнаино-Прошки (10–11 км), в ельнике чернично-мшистом, у дороги на *U. subfloridana* на осине, В.В. Голубков, 16.06.1986 (GSU-2245); 3 км. ЮВ д. Прошки, в сосняке мшистом на *B. nadvornikiana* на сосне, 16.06.1986 (GSU-2246); 1 к 3 д. Сукали, переходная полоса от сосняка сфагнового в сосняк чернично-мшистый, на *B. vrangiana*, В.В. Голубков, 18.06.1986 (GSU-2247); **Докшицкий район**, Березинский биосферный заповедник (ББЗ), Березинское л-во, квартальный столб м/у кв. 45/44/57, 54°55'02,4" N, 28°12'08,0" E, на *B. nadvornikiana* на ели, П.Н. Белый, 20.02.2008 (GSU-2248); 1,5 км СЗ д. Замосточье, в ельнике мшистом на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 15.10.2010 (GSU-2249); **Лепельский район**, военная база «Боровка» на *U. hirta* на берёзе, П.Н. Белый, 22.05.2010 (GSU-2250); 2,5 км ЮВ д. Барсуки, в ельнике черничном на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 15.07.2010 (GSU-2251); ББЗ, болотный массив «Савский Мох», кв. 270, на *U. hirta* на берёзе, П.Н. Белый, 20.10.2006 (GSU-2252); ББЗ, граница Терешкинского и Паликского лесничеств, просека м/у 610 кв. (выд. 10, 24) и 626 кв. (выд. 5, 7), в ельнике долгомошном на *B. capillaris* на ели, П.Н. Белый, 11.01.2008 (GSU-2253); ББЗ, по дороге из д. Крайцы в д. Броды, в смешанном лесу на *U. subfloridana* на берёзе, Н.В. Горбач, 20.10.1962 (GSU-2254); там же на *U. hirta* на берёзе, Н.В. Горбач, 20.10.1962 (GSU-2255); ББЗ, окр. д. Крайцы на *U. glabrescens* var. *glabrescens*, В.В. Голубков, 03.11.1986 (GSU-2256); ББЗ, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне, В.В. Голубков, 24.07.1981 (GSU-2257); Березинский биосферный заповедник, в сосняке мшистом на *U. hirta* на сосне, 11.07.1991 (GSU-2258); ББЗ, Домжерицкое л-во, кв. 284А, в ельнике кисличном на *U. dasopoga* на ели, П.Н. Белый, 30.09.2006 (GSU-2259); то же л-во, кв. 314, в сосняке мшистом на *U. subfloridana* на сосне, П.Н. Белый, 29.09.2006 (GSU-2260); то же л-во, кв. 334Б, выд. 20 на *U. dasopoga* на ели, П.Н. Белый, 18.10.2006 (GSU-2261); то же л-во, кв. 334В, выд. 9, в ельнике кисличном на *U. subfloridana* на ели, П.Н. Белый, 26.08.2006 (GSU-2262); ББЗ, окр. д. Домжерицы, в черноольшанике на *U. glabrescens* var. *fulvoreagens*, Н.В. Горбач, 03.11.1968 (GSU-2263); ББЗ, Паликское л-во, кв. 650, выд. 11, в осиннике дубово-кисличном на *U. dasopoga* на ольхе чёрной, П.Н. Белый, 08.06.2008 (GSU-2264); там же на *U. subfloridana* на ольхе чёрной, П.Н. Белый, 08.06.2008 (GSU-2265); ББЗ, урочище «Куты», в сосняке-зеленомошнике на *U. subfloridana* на берёзе, Н.В. Горбач, 16.05.1968 (GSU-2266); ББЗ, урочище «Нешково», на *U. hirta* на берёзе, Н.В. Горбач, 12.10.1962 (GSU-2267); ББЗ, урочище «Увязок», на *U. glabrescens* var. *fulvoreagens* на берёзе, Н.В. Горбач, июнь 1963 (GSU-2268); **Оршанский район**, 3,5 км Ю д. Добрино, в ельнике кисличном на *U. subfloridana* на ели, П.Н. Белый, 15.06.2011 (GSU-2269); **Полоцкий район**, между д. Глубокое и д. Рассамой, на *B. implexa* на берёзе у дороги, 20.07.1985 (GSU-2270); **Россонский район**, 2 м ЮЗ д. Межно, в сосняке елово-березово-мшистом на *U. subfloridana* на берёзе, В.В. Голубков, 02.09.1988 (GSU-2271); в сосняке черничном на *B. nadvornikiana* на сосне, 14.10.1984 (GSU-2272); у дороги на *U. glabrescens* var. *glabrescens* на берёзе, Н.В. Горбач, 30.09.1984 (GSU-2273); заказник «Красный Бор», верховое болото Большой Мох, СЗ часть болота, СЗ д. Юховичи, на *U. hirta* на сосне, О.В. Созинов, 03.08.2007 (GSU-2274); заказник «Фомино», в сосняке елово-березово-черничном на *U. subfloridana* на берёзе, В.В. Голубков, 03.10.1984 (GSU-2275); 1,3 км СВ д. Красный Бор, Юховичское л-во, кв. 23, в сосняке мшистом на *B. capillaris* на ели, Д.В. Дубовик, А.Н. Скуратович, 11.09.2011 (GSU-2276); окр. д. Юховичи, в ельнике сосново-

берёзово-чернично-мшистом на *B. vrangiana*, на стволе берёзы, В.В. Голубков, 30.09.1987 (GSU-2277); окр. д. Юховичи, в ельнике сфагновом на *U. subfloridana* на ольхе чёрной, В.В. Голубков, 29.08.1987 (GSU-2278); окр. д. Юховичи, верховое болото, на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 29.08.1987 (GSU-2279); **ГОМЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ, Буда-Кошелевский район**, д. Кленовица, в смешанном лесу на *U. hirta* на сосне, А.Г. Цуриков, 03.07.2005 (GSU-2280); **Гомельский район**, УНБ «Ченки», на *U. hirta* на сосне, А.Г. Цуриков, 16.06.2002 (GSU-2281); **Житковичский район**, окр. д. Червоное, на *U. hirta* на берёзе, Д.К. Иванова, 04.07.1956 (MSK-L, GSU-2282); НП «Припятский», Озеранское л-во, кв. 18, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне, О.П. Шахрай, 05.07.1974 (GSU-2283); то же л-во, кв. 50, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне, О.П. Шахрай, 06.07.1974 (GSU-2284); то же л-во, кв. 59, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне, Г.И. Швеиц, 08.07.1974 (GSU-2285); то же л-во, кв. 59, в сосняке лишайниковом на *U. subfloridana* на сосне, Г.И. Швеиц, 08.07.1974 (GSU-2286); то же л-во, кв. 60, в березняке злаковом на *U. hirta* на берёзе, О.П. Шахрай, 19.07.1971 (GSU-2287); то же л-во, кв. 60, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на берёзе, О.П. Шахрай, 05.07.1974 (GSU-2288); то же л-во, кв. 141; 1,5 км СЗ д. Бечи, в пойменной дубраве на *U. hirta* на ясене, В.В. Голубков, 22.08.2010 (GSU-2289); НП «Припятский», Озерано-Млынокское л-во, кв. 85, в сосняке долгомошном на *U. hirta* на сосне, В.П. Прокопенко, 15.03.1977 (GSU-2290); НП «Припятский», Переровское л-во, кв. 23, в сосняке орляковом на *U. hirta* на берёзе, Л.Н. Парукова, 16.05.1973 (GSU-2291); то же л-во, кв. 23, на опушке болота на *U. hirta* на сосне, О.П. Шахрай (GSU-2292); то же л-во, кв. 66, в березняке разнотравном на *U. hirta* на берёзе, О.П. Шахрай, 12.07.1973 (GSU-2293); то же л-во, кв. 72, верховое болото, на *U. hirta* на берёзе, О.П. Шахрай, 18.06.1974 (GSU-2294); то же л-во, кв. 73, верховое болото, на *U. hirta* на берёзе, О.П. Шахрай, 02.07.1974 (GSU-2295); **Калинковичский район**, 1,2 км В г.п. Озаричи, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне, П.Н. Белый, 02.03.2014 (GSU-2296); **Лельчицкий район**, Симоновичское л-во, 1 км З д. Симоничская Рудня, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне, В.В. Голубков, 20.08.2009 (GSU-2297); НП «Припятский», Млынокское л-во, в сосняке вересковом на *U. hirta* на сосне, В.П. Прокопенко, 13.03.1977 (GSU-2298); то же л-во, в сосняке мшистом на *U. hirta* на сосне, О.П. Шахрай, 10.06.1975 (GSU-2299); то же л-во, кв. 60, на *U. hirta* на берёзе, Л.Н. Парукова, 19.07.1971 (GSU-2300); то же л-во, кв. 546, окр. д. Симоничская Рудня, в сосновом лесу на *U. hirta*, В.В. Голубков, 20.08.2009 (GSU-2301); НП «Припятский», Снядинское л-во, кв. 52, в сосново-черничном лесу на *U. hirta* на сосне, О.П. Шахрай, 07.07.1973 (GSU-2302); **Мозырский район**, в дубраве разнотравной, около дороги, на *U. hirta* на сосне, В.В. Голубков, 26.08.1976 (GSU-2303); Мозырская гряда, в березняке орляковом на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 26.08.1976 (GSU-2304); там же на *B. vrangiana* на берёзе, В.В. Голубков, 26.08.1976 (GSU-2305); Мозырская гряда, в черноольшанике (смесь с сосной и берёзой) на *U. hirta* на ольхе чёрной, В.В. Голубков, 26.08.1976 (GSU-2306); **Петриковский район**, НП «Припятский», Переровское л-во, кв. 23, на опушке болота на *U. hirta* на ольхе чёрной, О.П. Шахрай, 18.06.1974 (GSU-2307); НП «Припятский», Снядинское л-во, кв. 104, в сосняке берёзово-вересковом на *U. hirta* на берёзе, 13.08.1982 (GSU-2308); то же л-во, кв. 116, в сосновом лесу на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 10.08.1982 (GSU-2309); то же л-во, кв. 116, в сосняке лишайниковом (переход в сосняк вересковый) на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 10.08.1982 (GSU-2310); то же л-во, кв. 116, 117, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на берёзе, 11.08.1982 (GSU-2311); то же л-во, кв. 117, в ельнике чернично-мшистом на *U. hirta* на сосне, 08.08.1982 (GSU-2312); то же л-во, кв. 120, в сосняке мшистом с фрагментами лишайникового на *U. hirta* на сосне, 13.08.1982 (GSU-2313); то же л-во, кв. 120, 119, 112, окр. д. Млынок, в сосняке лишайниковом с фрагментами мшистого на *U. hirta* на дубе, В.В. Голубков, 10.08.1982 (GSU-2314); то же л-во, кв. 120, в сосняке мшистом с фрагментами лишайникового на *U. hirta* на сосне, В.В. Голубков, 13.08.1982 (GSU-2315); **ГРОДНЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ, Ивьевский район**, правый берег р. Западная Березина, на *U. hirta* на дубе, 01.07.1977 (GSU-2316); **Мостовский район**, устье р. Щара, в плакорной дубраве на *U. hirta* на берёзе, 28.08.1999 (GSU-2317); **Новогрудский район**, 4 км СВ д. Бор, в ельнике мшистом на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 10.09.2010 (GSU-2318); п. Вселюб, в сосновом лесу на *U. subfloridana* на

берёзе, А.М. Буслейко, июль 1970 (GSU-2319); **Свислочский район**, НП «Беловежская пу-
ща», Бровское л-во, кв. 103, в черноольшанике на *U. dasopoga* на ольхе чёрной,
В.В. Голубков, 25.09.1984 (GSU-2320); **Щучинский район**, Новогрудское л-во, окр. д. Зуб-
рово, в черноольшанике кочедыжниковом на *U. dasopoga* на ели, В.В. Голубков, 14.08.1999
(GSU-2321); долина р. Котра, окр. д. Зуброво, на *U. hirta*, В.В. Голубков, 19.08.1999 (GSU-2322);
МИНСКАЯ ОБЛАСТЬ, Вилейский район, окр. г. Вилейка, в сосняке вересково-
лишайниковом на *U. dasopoga* на берёзе, Г.Н. Антонов, 18.05.1985 (GSU-2323); **Воложин-
ский район**, в ельнике лишайниковом на *U. subfloridana* на сосне, В.В. Голубков, 09.09.1973
(GSU-2324); в ельнике мшистом на *B. capillaris* на ели, В.В. Голубков, 09.09.1973 (GSU-2325);
Налибокская пуца, Прудское л-во, кв. 98, на опушке, посадки сосны на *U. hirta* на листвен-
нице, А. Песнякевич, 09.11.1974 (GSU-2326); окр. д. Яцково и пос. Первомайский, в сосняке
берёзово-вересково-мшистом на *U. dasopoga* на берёзе, В.В. Голубков, 09.09.1972 (GSU-
2327); **Крупский район**, 2 км СЗ д. Новые Язбы, в ельнике березово-черничном на *U. hirta*
на берёзе, 21.08.1987 (GSU-2328); **Логойский район**, окр. г.п. Плещеницы, правая сторона
шоссе на Витебск, в березняке разнотравном на *U. hirta* на берёзе, В.В. Голубков, 22.07.1975
(GSU-2329); там же, в сосняке мшистом на *B. implexa* на сосне, В.В. Голубков, 22.07.1975
(GSU-2330); г.п. Плещеницы на *U. dasopoga* на берёзе, В.В. Голубков, июль 1976 (GSU-2331);
Любанский район, 10 км ЮВ д. Тиль, на обочине дороги на *U. dasopoga*, Г.Н. Антонов,
20.07.1978 (GSU-2332); 11 км ЮВ д. Тиль, на обочине дороги на *U. hirta*, Г.Н. Антонов,
20.07.1978 (GSU-2333); **Молодечненский район**, окр. сан. «Сосновый бор», СОЗ «Бригати-
на», д. Сычевичи, в сосняке мшистом на *U. dasopoga*, А.К. Храмцов, 12.08.2004 (GSU-2334);
Мядельский район, ЛЗ «Голубые озера», в сосняке мшистом на *U. hirta* на сосне,
В.В. Голубков, 06.08.1976 (GSU-2335); ЛЗ «Голубые озёра», в березняке елово-черничном на
B. vrangiana на берёзе, В.В. Голубков, 08.08.1975 (GSU-2336); ЛЗ «Голубые озера», окр. оз.
Глушак, в ельнике мшистом на *U. hirta* на ели, В.В. Голубков, май 1976 (GSU-2337); там же
на *U. dasopoga* на берёзе, В.В. Голубков, 09.08.1976 (GSU-2338); НП «Нарочанский», Кон-
стантиновское л-во, 2,3 км ЮЗ от д. Ольшево кв. 81, выд. 20, 54°56'3.00"N, 26°20'3.81"E, в
ельнике кисличном на *U. subfloridana* на ели, П.Н. Белый, 18.08.2011 (GSU-2339); НП «Наро-
чанский», южный берег оз. Белое, кв. 109, в ельнике чернично-мшистом на *U. dasopoga* на
ели, П.Н. Белый, 19.08.2011 (GSU-2340); там же, на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 19.08.2011
(GSU-2341); 6 км СВ д. Мельники, в сосняке чернично-мшистом на *U. dasopoga* на берёзе,
В.В. Голубков (GSU-2342); окр. д. Степеново, в сосняке черничном на *U. hirta* на пне сосны,
В.В. Голубков, 11.07.1978 (GSU-2343); там же, на *U. subfloridana* на сосне, В.В. Голубков,
11.07.1978 (GSU-2344); окр. оз. Млынок, в сосняке мшистом на *U. dasopoga* на берёзе, А.П. Яцына,
14.06.2006 (GSU-2345); окр. оз. Нарочь, в сосняке лишайниковом на *U. hirta* на сосне,
В.В. Голубков, 18.07.1979 (GSU-2346); оз. Нарочь, окр. д. Степеново, в сосняке черничном на
U. hirta на сосне, В.В. Голубков, Котов, 12.07.1978 (GSU-2347); окр. оз. Нарочь и
д. Степеново, на границе сосняка багульникового и сосняка мшистого на *U. hirta* на сосне,
В.В. Голубков, 18.07.1979 (GSU-2348); **Столбцовский район**, 1 км СВ оз. Кромань, в ельнике
мшистом на *U. dasopoga* на ели, П.Н. Белый, 12.09.2010 (GSU-2349); 7,5 км СВ д. Клетиче, в
ельнике кисличном на *U. hirta* на ели, П.Н. Белый, 10.09.2010 (GSU-2350); **МОГИЛЁВ-
СКАЯ ОБЛАСТЬ, Горецкий район**, г. Горки, на посадках деревьев на *U. hirta*,
Н.О. Цеттерман, 03.06.1929 (GSU-2351).

Закключение. В ходе проведённого исследования 626 гербарных образцов родов *Bryoria*
и *Usnea* Беларуси было выявлено 14 образцов лишайников рода *Bryoria* (8,6 % от общего
числа просмотренных образцов данного рода) и 115 образцов лишайников рода *Usnea*
(24,8 % от общего числа просмотренных образцов), на слоевищах которых был обнаружен
лихенофильный гриб *Lichenostigma maureri*. Наши исследования показали, что лихенофиль-
ный гриб *Lichenostigma maureri* встречается достаточно часто на территории Беларуси, пре-
имущественно в северо-западных регионах страны, что отражает выявленную ранее встре-
чаемость лишайников-хозяев.

Благодарности. Выражаю глубокую благодарность кандидату биологических наук,
доценту Владимиру Владимировичу Голубкову (Гродно) и кандидату биологических наук,

доценту, ученому секретарю Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси Павлу Николаевичу Белому за предоставленные гербарные образцы лишайников родов *Bryoria* и *Usnea*.

Литература

1. Lawrey, J. D. Lichenicolous fungi : interactions, evolution, and biodiversity / J. D. Lawrey, P. Diederich // *Bryologist*. – 2003. – Vol. 106. – P. 80–120.
2. Diederich, P. The 2018 classification and checklist of lichenicolous fungi, with 2000 nonlichenized, obligately lichenicolous taxa / P. Diederich, J. D. Lawrey, D. Ertz // *Bryologist*. – 2018. – Vol. 121, № 3. – P. 340–425.
3. Ertz, D. Molecular data resolve a new order of Arthoniomycetes sister to the primarily lichenized Arthoniales and composed of black yeasts, lichenicolous and rock inhabiting species / D. Ertz, J. D. Lawrey, R. S. Common, P. Diederich // *Fungal Diversity*. – 2013. – Vol. 66. – P. 113–137.
4. Цуриков, А. Г. Лишайники Беларуси / А. Г. Цуриков. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – 379 с.
5. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. I. *B. capillaris* и *B. nadvornikiana* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый, И. М. Болсун // *Веснік Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна*. – 2023. – № 2. – С. 61–69.
6. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. II *Bryoria implexa* s. lat. / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый, И. М. Болсун // *Экспериментальная биология и биотехнология*. – 2023. – № 2. – С. 65–80.
7. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. III. *B. furcellata* и *B. fuscescens* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый, И. М. Болсун // *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы*. – 2023. – Т. 13, № 2 – С. 118–124.
8. Цуриков, А. Г. Лишайники рода *Bryoria* Национального Парка «Припятский» / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, П. Н. Белый, И. М. Болсун // *Мониторинг и оценка состояния растительного мира : матер. VI Междунар. науч. конф., Минск, 9–13 октября 2023 г. / Ин-т экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Б, НП «Припятский»*. – Минск, 2023. – С. 331–333.
9. Orange, A. Microchemical methods for the identification of lichens / A. Orange, P. W. James, F. J. White. – London : British Lichen Society, 2001. – 101 p.
10. Brackel, W. Kommentierter Katalog der flechtenbewohnenden Pilze Bayerns / W. Brackel // *Bibliotheca Lichenologica*. – 2014. – Vol. 109. – P. 1–476.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 29.04.2024

Генетический полиморфизм микросателлитного локуса B-100 в популяциях шмелей *Bombus terrestris* L.

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО, С.А. ЗЯТКОВ, А.В. КРУК

В работе установлены аллельные частоты и гетерозиготность в популяциях шмелей *Bombus terrestris* юго-востока Беларуси на основе анализа микросателлитного локуса B-100. Приведена последовательность праймеров оптимальная для ДНК-анализа микросателлитного локуса B-100.

Ключевые слова: шмели, *Bombus*, ПЦР, локус B-100, микросателлиты, гетерозиготность.

The allelic frequencies and heterozygosity in bumblebee populations of *Bombus terrestris* in the South-East of Belarus were established based on the analysis of the microsatellite locus B-100. The sequence of the primers optimal for DNA analysis of microsatellite locus B-100 is given.

Keywords: bumblebees, *Bombus*, PCR, locus B-100, microsatellites, heterozygosity.

Введение. Микросателлиты представляют собой отрезки ДНК с большим количеством (до ста и выше) tandemно повторяющихся идентичных фрагментов. **Повтором** является короткая последовательность из нескольких (от двух до восьми) пар нуклеотидов [1]. В зависимости от длины повтора микросателлиты подразделяются на локусы с ди-, три-, тетра- и пентануклеотидными повторами. Таким образом, **микросателлитным локусом** называют участок ДНК, содержащий **короткие tandemные повторы** (Short Tandem Repeats, STR).

Необходимо отметить, что с момента открытия микросателлиты были обнаружены у широкого спектра эукариот, включая перепончатокрылых [2], [3]. Микросателлиты, как правило, имеют много аллелей и высокую гетерозиготность у насекомых, что делает их потенциально эффективными маркерами для популяционно-генетических исследований перепончатокрылых [4], [5].

Довольно удобными для исследований оказались микросателлиты с динуклеотидными повторами, которые представляют собой многочисленные повторяющиеся элементы ДНК в геномах многих эукариот [6], [7].

Следует подчеркнуть, что согласно классификации Вебера [8], микросателлиты с динуклеотидными повторами подразделяются на три класса: совершенные (непрерывная последовательность одного типа), несовершенные (состоят из одной или нескольких прерывающихся последовательностей одного и того же типа) и сложные (состоят из совершенных или несовершенных повторов, прерывающихся другими простыми последовательностями) [6]–[8].

Целью данной работы было выявить наиболее удобный динуклеотидный микросателлитный маркер для идентификации генотипов и оценки генетического полиморфизма у особей хозяйственно ценного вида шмелей *B. terrestris* L. в природных популяциях юго-востока Беларуси.

Материалы и методы исследований. Для анализа отлавливались особи из 6 природных популяций Большого земляного шмеля *B. terrestris* расположенных на территории Гомельского, Ветковского, Жлобинского, Мозырского и Лельчицкого районов юго-востока Беларуси. Причем для исследования брали маток и рабочих шмелей. Затем отпрепарированные биологические образцы, полученные из грудных мышц и конечностей *B. terrestris*, подвергали выделению суммарной ДНК. Для выделения ДНК из грудных мышц оптимальным оказался упрощенный СТАВ-метод, а из конечностей – SDS-метод и метод с использованием ионно-обменной смолы Chelex 100 [9]. Все этапы ПЦР-анализа подробно описаны в ранее опубликованных нами работах [10], [11].

Результаты и обсуждение. В ходе проведенного нами анализа ряда микросателлитов наиболее удобным маркером для идентификации особей *B. terrestris* оказался микросателлитный локус **B-100** с динуклеотидным сложным повтором.

На основании проведенных экспериментов была подобрана оптимальная пара праймеров для ПЦР-амплификации и выявления микросателлитного локуса B-100, с мотивом (СТ)₁₂GTC(СТ)₃ для идентификации особей *B. terrestris*, которая представлена ниже:

Прямой: F: 5'- CGTCCTCGTATCGGGCTAAC -3'

обратный: R: 5'- CGTGGAACGTCGTGACG -3'.

Нуклеотидная последовательность локуса B-100 (GenBank: NC_063280) [12], содержащего повторы СТ (выделена цветом) и прилежащие к повторам справа и слева (фланкирующие) последовательности ДНК с указанием мест присоединения праймеров (подчеркнутые участки), представлены на рисунке 1.

```

1  cgtcctcgta tgggctaac tttcttcgta aacttgcgcc atttttccac cgcgtccacc
61 ctttgtgccc tgcctttcca cctctccct cctctctttc tctctctctc tctctctctc
121 tctgtcctct ctttcaaacc agcgtggaag cgtcgtgacg
  
```

Рисунок 1 – Фрагмент ДНК размером 160 н.п., содержащий (СТ)₁₂GTC(СТ)₃ повторы локуса B-100 и фланкирующие его участки

Из рисунка 1 хорошо видно, что данный аллель локуса B-100 содержит микросателлитный несовершенный динуклеотидный повтор, повторенный 12 + 3 раза. Поэтому формула данного аллеля записывается как (СТ)₁₂GTC(СТ)₃.

Продукты амплификации для последующей идентификации микросателлитов подвергались фрагментному сиквенс-анализу на капиллярном генетическом секвенаторе (анализаторе) 3500 Applied Biosystem (США). В качестве маркера использовался оранжевый маркер масс GeneScan™ 500 LIZ™ (Thermo Fisher). Информация о длине аллелей по исходным данным получена в программе GeneMapper v.4.1 («Applied Biosystems», «Life technologies», США). Статистическую обработку данных проводили с помощью программы GenAlEx 6.50 [13]. Характерные спектры генотипов микросателлитного локуса B-100 для трех образцов шмелей приведены на рисунке 2.

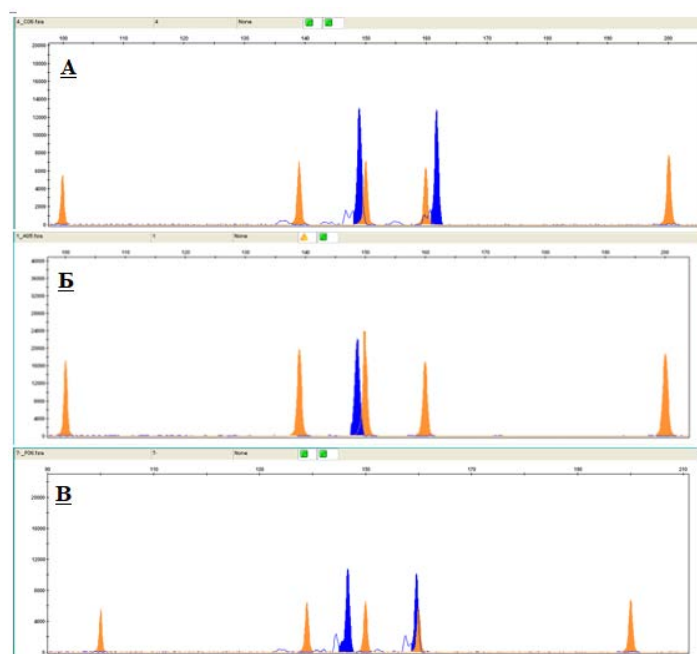


Рисунок 2 – Спектр основных генотипов *B. terrestris* по локусу B-100:

А) 148\162; Б) 148\148; В) 146\160. Электрофоретические маркеры 139, 150, 160, 200 н.п. – оранжевый цвет, STR-локусы – синий

В целом, в ходе анализа 16 особей *B. terrestris* из 6 природных популяций юго-востока Беларуси нами было обнаружено 7 различных аллельных вариантов STR-локуса B-100 (146, 148, 150, 156, 160, 162, 164 н.п.).

Частоты встречаемости 7 аллелей и показатели гетерозиготности в юго-восточных белорусских популяциях шмелей *B. terrestris*, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Аллельные частоты и показатели гетерозиготности по микросателлитному локусу B-100 в популяциях шмелей *B. terrestris*

аллели	146	148	150	156	160	162	164	Но	Не
частоты	0,094	0,655	0,063	0,063	0,063	0,031	0,031	0,313	0,548

Из таблицы 1 хорошо видно, что *преобладающим* для популяций *B. terrestris* юго-востока Беларуси является аллель 148, который встречался с частотой более 65 %. Вторым по частоте встречаемости 9,4 % является аллель 146. Еще 3 аллеля встречались с частотой 6,3 % и 2 аллеля встретились только по одному разу и имели частоту 3,1 % (таблица 1).

Наибольшим аллельным разнообразием обладали популяции Жлобина и Лельчиц – 4 и 3 аллеля, соответственно. Присутствие только одного аллеля в популяциях Ветки и Мозыря объясняется тем, что проанализированные особи из этих популяций оказались гомозиготными по наиболее характерному для юго-востока Беларуси аллелю 148. Следует подчеркнуть, что в европейских популяциях, включая балканские, количество найденных аллелей было выше и составило 14 [14].

Значение средней наблюдаемой гетерозиготности H_o для белорусских популяций в целом составило 0,32, в то время как средняя ожидаемая гетерозиготность H_e равнялась 0,55 (см. таблицу 1). Достоверно меньшее значение показателя наблюдаемой гетерозиготности в проанализированных популяциях *B. terrestris* по сравнению с ожидаемой указывает на наличие инбридинга в этих популяциях. В то же время эта разница в показателях гетерозиготности скорее всего связана с ограниченной выборкой исследованных нами особей в популяциях *B. terrestris* юго-востока Беларуси.

Следует отметить, что в ходе анализа популяций *B. terrestris* с использованием микросателлитного локуса B-100 на Европейском континенте, включая Балканы, Пиренеи и Центральную Европу, было обнаружено 14 аллелей и гетерозиготность по обоим показателям H_o и H_e превышала 60 % [14].

Существенную разницу в показателях гетерозиготности между южно-белорусскими и европейскими популяциями [14] также легче всего объяснить ограниченной выборкой особей проанализированных нами в белорусских популяциях. Однако нельзя исключить и определенную обособленность белорусских популяций *B. terrestris* от европейских. Для окончательного выяснения этого вопроса необходимы расширенные исследования белорусских популяций с привлечением дополнительных микросателлитных локусов и количества особей.

Данная работа проводилась в рамках задания «2.05» НИР № 5.6 программы ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг.

Литература

1. Tautz, D. Notes on the definition and nomenclature of tandemly repetitive DNA sequences / D. Tautz // DNA Fingerprinting : State of the Science. – Switzerland : Basel, 1993. – P. 21–28.
2. Estoup, A. Characterization of (GT) n and (CT) n microsatellites in two insect species : *Apis mellifera* and *Bombus terrestris* / A. Estoup [et al.] // Nucleic Acids Research. – 1993. – Vol. 21, № 6. – P. 1427–1431.
3. Hughes, C. R. Detection of highly polymorphic microsatellite loci in a species with little allozyme polymorphism / C. R. Hughes, D. C. Queller // Mol. Ecol. – 1993. – Vol. 2 (3). – P. 131–137.
4. Queller, D. C. Microsatellites and kinship / D. C. Queller, J. E. Strassmann, C. R. Hughes // Mol. Ecol. – 1993. – Vol. 8 (8). – P. 285–8.
5. Estoup, A. Size homoplasy and mutational processes of interrupted microsatellites in two bee species, *Apis mellifera* and *Bombus terrestris* (Apidae) / A. Estoup [et al.] // Molecular Biology and Evolution. – 1995. – Vol. 12 (6). – P. 1074–84.
6. Wintero, A. K. Variable (dG-dT) n (dC-dA) n Sequences in the Porcine Genome / A. K. Wintero, M. Fredholm, P. D. Thomsen // Genomics. – 1992. – Vol. 12. – P. 281–288.

7. Симоненко, В. Н. Структурно-функциональные особенности микросателлитных последовательностей и их использование в изучении генома сельскохозяйственных животных / В. Н. Симоненко, Н. П. Корохов, В. Г. Шевченко // Современные проблемы биотехнологии и биологии продуктивных животных. Сборник научных трудов. – Боровск, 1999. – Т. XXXVIII. – С. 546.
8. Weber, J. L. Mutation of human short tandem repeats / J. L. Weber, C. Wrong // Human Molecular Genetics. – 1993. – Vol. 2. – P. 1123–1128.
9. Sambrook, J. Molecular Cloning : a Laboratory Manual / J. Sambrook, E. F. Fritsch, T. Maniatis. – New York : Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1989. – 270 p.
10. Гончаренко, Г. Г. Видовая идентификация особей близких видов шмелей с использованием митохондриального гена COI / Г. Г. Гончаренко, С. А. Зятков // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2023. – № 3 (138). – С. 116–117.
11. Walter, B. The Mss4 protein is to regulate stress response and apoptosis / B. Walter, C. Nordhoft, G. Goncharenko, S. Ludwig, V. Wixler // Cell Death and Disease. – 2012. – № 3. – e297.
12. NCBI [Electronic resource] // National Center for Biotechnology Information Search database. – Mode of access : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/NC_063280.1/. – Date of access : 14.02.2025.
13. Peakall, R. GenAlEx 6.5 : genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research / R. Peakall, P. E. Smouse // Bioinformatics. – 2012. – Vol. 28 (19). – P. 2537–9.
14. Estoup, A. Genetic differentiation of continental and island populations of *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apidae) in Europe / A. Estoup [et al.] // Mol. Ecol. – 1996. – Vol. 5. – P. 19–31.

Оценка доз внутреннего облучения ихтиофауны Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

А.В. Гулаков¹, Д.Н. Дроздов¹, Д.Н. Иванцов²

В статье представлены данные распределения доз внутреннего облучения некоторых видов «мирных» и «хищных» пелагических рыб, обитающих в водных объектах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Согласно полученным данным установлено, что вне зависимости от характера гидрологического режима доминирующий вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят инкорпорированные в мышечную ткань радионуклиды ^{137}Cs . Суммарная доза внутреннего облучения «мирных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом, за период наблюдения составила 287 ± 52 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 393 ± 60 мкГр/сут. Суммарная доза внутреннего облучения «хищных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом, за период наблюдения составила 578 ± 293 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 597 ± 302 мкГр/сут. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в отношении данных видов рыб имеет место превышение безопасного порога облучения, способного оказывать влияние на воспроизведение популяции.

Ключевые слова: ихтиофауна, доза внутреннего облучения, цезий-137, стронций-90, ПГРЭЗ.

The article presents the data on the distribution of doses of internal radiation of some species of «peaceful» and «predatory» pelagic fish living in the water bodies of the Polesky State Radiation and Ecological Reserve. According to the data obtained, it was found that, regardless of the nature of the hydrological regime, ^{137}Cs radionuclides incorporated into muscle tissue make a dominant contribution to the formation of the internal radiation dose. The total dose of internal radiation of «peaceful» fish species living in flowing objects with an active hydrological regime during the observation period was 287 ± 52 $\mu\text{Gy/day}$; the total dose of internal radiation for a less active water body of the old type was 393 ± 60 $\mu\text{Gy/day}$. The total dose of internal radiation of «predatory» fish species living in flowing objects with an active hydrological regime during the observation period was 578 ± 293 $\mu\text{Gy/day}$; the total dose of internal radiation for a less active old-type water body was 597 ± 302 $\mu\text{Gy/day}$. The results obtained indicate that in relation to these fish species, the safe exposure threshold is exceeded, which can affect the reproduction of the population.

Keywords: ichthyofauna, internal radiation dose, cesium-137, strontium-90, PSRER.

Введение. Юго-восточные территории Республики Беларусь в границах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника представляют уникальную возможность проведения исследований влияния хронического облучения на различные биологические объекты в естественных экосистемах. Одним из возможных объектов изучения являются водные экосистемы с разным гидрологическим режимом и обитающая в них аборигенная ихтиофауна. Исследование дозовых нагрузок на ихтиофауну водных объектов, расположенных на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, ведется на протяжении длительного периода времени, что отражено в работах [1]–[3]. Выполненные исследования в отношении водных объектов с разным гидрологическим режимом для разных видов рыб позволяют произвести оценку влияния радиационного фактора на состояние биоты речных и озерных экосистем.

Водные объекты, расположенные на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, представляют отдельный интерес для изучения радиационных эффектов. В условиях гидроэкосистемы происходит более быстрая, в сравнении с почвой, трансформация источников загрязнения радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , что опосредует их аккумуляцию в организме и последующее формирование дозы облучения. Ранее в работе [4] было показано, что наибольшие значения удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr у рыб наблюдаются в непроточных водоемах, расположенных на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения, а наименьшие – в проточных речных системах.

На формирование доз облучения разных видов рыб влияет не только уровень радиоактивного загрязнения водного объекта, но и другие факторы, в том числе, такие как тип и характер пищевого поведения, гидрологический режим водного объекта, возраст животных и другие. Анализ действия разных факторов на формирование доз облучения ихтиофауны показал достоверные различия придонных мирных и пелагических хищных видов, обитающих в закрытых водных объектах.

Дозы внутреннего облучения у пелагических видов, вследствие накопления ^{90}Sr , в два раза ниже, чем дозы облучения пелагических хищников; дозы облучения придонных и пелагических видов, сформированные вследствие накопления ^{137}Cs , не имеют достоверных различий. В данной связи целесообразно провести сравнительный анализ доз облучения придонных мирных и пелагических хищных видов рыб открытых (проточных) и закрытых (непроточных) водных объектов.

Цель работы – оценить характер распределения доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr пелагических «мирных» и хищных видов рыб проточных и непроточных водных объектов.

Материалы и методы исследования. Изъятие проб пелагических «мирных» и хищных видов рыб производилось на озере старичного типа Семеница и участке реки Припять. Озеро Семеница $51^{\circ}37'14''$ СШ и $29^{\circ}47'53''$ ВД, расположено в юго-западном направлении в 34 км от г. Хойники; озеро старичного типа, относится к бассейну реки Припять; плотность радиоактивного загрязнения по ^{137}Cs в пределах $999,2 \pm 354,0$ кБк/м², загрязнение донных отложений ^{90}Sr в пределах $15,6 \pm 7,0$ кБк/м². Средняя удельная активность воды от радионуклидов ^{137}Cs составляет 0,93 Бк/л, от радионуклидов ^{90}Sr – 0,57 Бк/л. В пределах зоны отчуждения длина реки Припять около 50 км, от населенного пункта Довляды $51^{\circ}31'29''$ СШ $29^{\circ}51'57''$ ВД до впадения в Киевское водохранилище. Площадь водосбора составляет около 2000 км².

Отлов рыб производился в летний и осенний период на протяжении 2018–2021 гг. Всего за время проведения исследований было изъято 1059 экземпляров пресноводной ихтиофауны. В качестве «мирных» пелагических видов использовались плотва (*Rutilus rutilus* L.), линь (*Tinca tinca* L.), лещ (*Abramis brama* L.); «хищные» пелагических виды: обыкновенная щука (*Esox lucius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), жерех (*Aspius aspius* L.). В период выполнения исследования отловлено 370 особей плотвы, 50 особей линя, 253 особи леща, 143 особи щуки, 51 особей жереха и 192 особи окуня.

В качестве орудий лова использовались сети трехстенные «Нептун» длина 30 м, высота 1,8 м, размер ячеи 30 мм (2 шт.), 40 мм (2 шт.), 50 мм (2 шт.), 65 мм (2 шт.), 70 мм (2 шт.). При проведении лова рыб одновременно устанавливалось от двух до восьми сетей с разным размером ячеи. Определение видов и анализ биологических показателей рыб проводили общепринятыми в ихтиологических исследованиях методами [5].

Для определения удельной активности инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в отловленных образцах использовали гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315 и гамма-спектрометр «Canberra Industrias Inc» лаборатории спектрометрии и радиохимии Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

В результате измерения удельной активности произведен расчет поглощенной дозы внутреннего облучения. Оценку поглощенной дозы внутреннего облучения от инкорпорированных ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили на основании Рекомендаций Р52.18.820-2015 [6]. Для расчетов использовали значения фактора дозового перехода для внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr [7]. Для оценки достоверности различий и проведения сравнительного анализа использовали методы параметрической статистики для уровня статистической значимости $p \leq 0,05$. Обработка данных проводилась с помощью пакета прикладных программ Statistica 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение. В ходе исследования и анализа значения удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr были распределены на трофические группы рыб с привязкой к месту отлова. Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдались у особей *Rutilus rutilus* L., которые были изъятые на непроточном водном объекте озеро Семеница. Минимальные значения удельной активности ^{137}Cs имели особи *Abramis brama* L., которые были добыты на проточном водном объекте реки Припять. Максимальное значение удельной ак-

тивности ^{90}Sr наблюдались у особей *Rutilus rutilus* L., которые были отловлены на проточном водном объекте река Припять. Минимальные значения удельной активности ^{90}Sr имели особи *Abramis brama* L., которые были изъятые на непроточном водном объекте озеро Семеница.

Средняя взвешенная удельная активность «мирных» рыб по ^{137}Cs изъятых на водном объекте река Припять составляет $68,6 \pm 5,0$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $76,0 \pm 5,0$ Бк/кг. Между средними значениями удельной активности ^{137}Cs «мирных» рыб отсутствует достоверное различие ($p > 0,05$). Средняя взвешенная удельная активность «мирных» рыб по ^{90}Sr , добытых на водном объекте река Припять, составляет $1,66 \pm 0,5$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $5,0 \pm 0,8$ Бк/кг. Из полученных данных следует, что между средними значениями удельной активности по ^{137}Cs и удельной активностью ^{90}Sr в ткани «мирных» рыб, изъятых в водных объектах с разным гидрологическим режимом, имеет место достоверное различие ($p < 0,05$).

Значения удельной активности «мирных» рыб были пересчитаны в дозу внутреннего облучения, величины для разных стационаров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Доза внутреннего облучения «мирных» рыб (мкГр/сут)

Вид	Цезий-137				Стронций-90			
	Река Припять		Озеро Семеница		Река Припять		Озеро Семеница	
Линь	337 ± 158	n = 22	187 ± 80	n = 19	35 ± 28	n = 6	36 ± 38	n = 3
	82–825		73–420		9–79		8–73	
Лещ	155 ± 126	n = 127	132 ± 43	n = 103	50 ± 58	n = 17	98 ± 56	n = 6
	46–1464		50–483		5–242		38–174	
Плотва	406 ± 376	n = 209	625 ± 100	n = 137	104 ± 71	n = 19	74 ± 80	n = 5
	27–5467		46–1218		9–318		8–186	

Из таблицы 1 видно, что средняя взвешенная доза внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs у «мирных» видов рыб, изъятых на реке Припять, составила 313 ± 274 мкГр/сут; на озере Семеница 394 ± 76 мкГр/сут. Средняя взвешенная доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr у «мирных» рыб, изъятых на реке Припять, составила 72 ± 59 мкГр/сут; на озере Семеница 76 ± 60 мкГр/сут.

Полученные данные свидетельствуют об отсутствии достоверных различий дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у «мирных» видов рыб, обитающих в разных стационарах ($p > 0,05$). В тоже время из данных таблицы 1 видно, что между средними значениями дозы внутреннего облучения, сформированной от разных радионуклидов, у «мирных» видов рыб имеет место достоверное различие ($p < 0,05$).

Доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани *Tinca tinca* L. более чем в 5 раз превышает дозу внутреннего облучения этого вида, сформированную от радионуклидов ^{90}Sr в костной ткани. Доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани *Rutilus rutilus* L. в 3 раза больше дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr в костной ткани. Для видов *Tinca tinca* L. и *Rutilus rutilus* L. установлено превышение безопасного порога облучения (10 мкГр/ч), которое может оказывать влияние на репродуктивную систему данных видов [8], [9].

Анализ распределения доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs «мирных» рыб показал, что величина верхнего квантиля дозы у рыбы, изъятая на участке реки Припять, составляет 2586 мкГр/сут, что более чем в 10 раз превышает безопасный порог облучения. Значение верхнего квантиля распределения дозы от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани рыб, изъятых на участке озера Семеница, составляет 707 мкГр/сут, что в 3 раз превышает безопасный порог облучения. Верхний квантиль распределения дозы внутреннего облучения от ^{90}Sr в костной ткани «мирной» рыбы, изъятая на реке Припять, составил 213 мкГр/сут, на озере Семеница 144 мкГр/сут; превышения безопасного порога облучения по данному радионуклиду не наблюдается. Оценка суммарной дозы облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr показало, что доза внутреннего облучения у «мирных» рыб, обитающих на участке реки Припять, составляет 287 ± 52 мкГр/сут; на озере Семеница 393 ± 60 мкГр/сут.

Анализ удельной активности мышечной и костной ткани «хищных» видов рыб показал, что минимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдается у особей *Perca fluviatilis* L., которые были отловлены на водном объекте озеро Семеница. Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдаются у особей вида *Esox lucius* L., которые были изъяты на водном объекте озеро Семеница. В отношении радионуклидов ^{90}Sr максимальное значение удельной активности наблюдается у особей вида *Esox lucius* L., которые были отловлены на водном объекте озеро Семеница.

Наименьшие значения удельной активности от ^{90}Sr имеют особи *Aspius aspius* L., изъятые на водном объекте озеро Семеница. Средняя взвешенная удельная активность «хищных» рыб от радионуклидов ^{137}Cs , изъятых на водном объекте река Припять, составляет $138,1 \pm 15,0$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $125,0 \pm 12,0$ Бк/кг.

Между средними значениями удельной активности ^{137}Cs «хищных» рыб отсутствует достоверное различие ($p > 0,05$). Средняя взвешенная удельная активность «хищных» рыб по ^{90}Sr , изъятых на водном объекте река Припять, составляет $1,6 \pm 0,5$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $9,1 \pm 0,6$ Бк/кг. Из полученных данных следует, что между средними значениями удельной активности ^{137}Cs «хищных» рыб, изъятых в водных объектах с разным гидрологическим режимом, имеет место достоверное различие ($p < 0,05$).

Значения удельной активности «хищных» рыб также были пересчитаны в дозу внутреннего облучения, величины для разных стационаров приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Доза внутреннего облучения «хищных» рыб (мкГр/сут)

Вид	Цезий-137				Стронций-90			
	Река Припять		Озеро Семеница		Река Припять		Озеро Семеница	
Щука	620 ± 327	$n = 73$	575 ± 416	$n = 54$	36 ± 22	$n = 9$	125 ± 154	$n = 7$
	87–2877		128–3183		12–79		15–423	
Жерех	666 ± 297	$n = 32$	958 ± 1105	$n = 13$	32 ± 13	$n = 3$	23 ± 12	$n = 3$
	68–1751		461–4446		14–36		9–30	
Окунь	625 ± 318	$n = 96$	643 ± 1000	$n = 84$	14 ± 6	$n = 6$	209 ± 81	$n = 6$
	73–3187		68–9229		3–18		79–277	

Из таблицы 2 видно, что средняя взвешенная доза внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs у «хищных» рыб, изъятых на реке Припять, составила 630 ± 318 мкГр/сут; на озере Семеница 646 ± 800 мкГр/сут. Средняя взвешенная доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr у «мирных» рыб, изъятых на реке Припять, составила 28 ± 15 мкГр/сут; на озере Семеница 137 ± 100 мкГр/сут.

Полученные данные свидетельствуют об отсутствии достоверных различий дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у «хищных» видов рыб, обитающих на разных стационарах ($p > 0,05$). Обращает внимание большой разброс значений доз внутреннего облучения у «хищных» рыб, сформированных от инкорпорированного ^{137}Cs ; вариационный размах достигает более 3 мГр/сут. Сравнительный анализ средних значений доз внутреннего облучения инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у разных видов рыб на разных водных объектах имеет достоверное различие ($p < 0,05$). Из таблицы 2 видно, что средние дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs достоверно выше доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr .

Превышение безопасного порога облучения, которое может оказывать влияние на репродуктивную систему данных видов, имеет место у особей «хищных» видов рыб, обитающих как на участке реки Припять, так и в озере Семеница. Вид *Esox lucius* L. имеет в среднем превышение в 2,5 раза, верхний квантиль распределения в 12 раз; *Aspius aspius* L. в 2,8 раза, верхний квантиль в 7 раз; *Perca fluviatilis* L. имеет в среднем превышение в 2,6, верхний квантиль в 13 раз. Анализ распределения доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs у «хищных» видов рыб показал, что величина верхнего квантиля дозы облучения у рыбы, изъятая на участке реки Припять, составило 2605 мкГр/сут. Значение верхнего квантиля распределения дозы от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани рыб, изъятых на участке озера Семеница, составляет 5619 мкГр/сут. Верхний квантиль распределения дозы внутренней облучения от ^{90}Sr в костной ткани «мирной» рыбы, изъятая на реке Припять, составил 44 мкГр/сут, на озере Семеница 243 мкГр/сут, что превышает безопасный порог облучения по данному радионуклиду.

Суммарная доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у «хищных» рыб, обитающих на участке реки Припять, составила 578 ± 293 мкГр/сут; на озере Семеница 597 ± 302 мкГр/сут.

Заключение. В результате анализа распределения доз внутреннего облучения некоторых видов «мирных» и «хищных» рыб, обитающих в водных объектах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, установлено, что вне зависимости от характера гидрологического режима доминирующий вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят радионуклиды ^{137}Cs , инкорпорированные в мышечную ткань. Суммарная доза внутреннего облучения «мирных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом, за период наблюдения составила 287 ± 52 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 393 ± 60 мкГр/сут.

Суммарная доза внутреннего облучения «хищных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом за период наблюдения составила 578 ± 293 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 597 ± 302 мкГр/сут. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в отношении данных видов рыб имеется превышение безопасного порога облучения, способного оказывать влияние на воспроизведение популяции.

Литература

1. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи : учеб. пособ. для студ. вузов / под ред. А. В. Аксеева. – Челябинск : Книга, 2016. – 400 с.
2. Гудков, Д. И. Радионуклиды в озерных экосистемах Красненской поймы р. Припять : содержание и распространение в биотических и абиотических компонентах / Д. И. Гудков [и др.] // Доп. АН України. – 2005. – № 5 – С. 187–193.
3. Гулаков, А. В. Цитогенетическое действие радиационного облучения на ихтиофауну водных объектов Полесского радиационно-экологического заповедника / А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов, Д. Н. Иванцов // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2024. – № 3 (144). – С. 17–21.
4. Иванцов, Д. Н. Зависимость накопления ^{137}Cs от промысловой длины хищных видов рыб / Д. Н. Иванцов, А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : VI Международная науч.-практ. конф., Гомель, 2–3 июня 2022 г. : сб. матер. / М-во обр. Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. П. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – С. 38–42.
5. Жуков, П. И. Справочник по экологии пресноводных рыб / П. И. Жуков. – Минск : Наука и техника, 1988. – 310 с.
6. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки : рек. Р52.18.820-2015. – Введ. 01.09.2015. – Обнинск, 2015 – 65 с.
7. Дроздов, Д. Н. Формирование поглощенной дозы облучения у аборигенной ихтиофауны не проточных водоемов Полесского радиационно-экологического заповедника / Д. Н. Дроздов, А. В. Гулаков // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2023. – № 3 (138). – С. 5–10.
8. Larsson, C.-M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants / C.-M. Larsson // Radioact. – 2008. – Vol. 99. – P. 1361–1518.
9. Andersson, P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations / P. Andersson [et al.] // PROTECT. – 2008. – Deliverable 5. – 112 p.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Полесский государственный радиозэкологический заповедник

Влияние витамина D и кальция в рационе на поступление стронция-90 в молоко на территории радиоактивного загрязнения

А.Ф. КАРПЕНКО¹, А.А. ЦАРЕНОК²

В статье анализируются результаты изучения уровней содержания кальция в кормах и рационе, витамина D в организме лактирующих коров и стронция-90 в молоке в зимне-стойловый период при разных способах дачи витамина D. Установлено, что применение препаратов витамина D вместе с кормом и инъекционно, на фоне его 88,9 % дефицита в рационе, способствует снижению поступления стронция-90 в молоко коров на 13,9 и 20,0 % соответственно. Наиболее эффективной формой использования витамина D для снижения перехода стронция-90 из рациона в молоко является инъекционное введение витамина животным. Исследования проводились на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь в рамках шестой Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 гг.

Ключевые слова: витамин D, кальций, всасывание, стронций-90, молоко.

The article analyzes the results of studying the levels of calcium in feed and diet, vitamin D in the body of lactating cows, and strontium-90 in milk during the winter stall period with different methods of giving vitamin D. It was found that the use of vitamin D preparations together with feed and injection, against the background of its 88,9 % deficiency in the diet, helps to reduce the intake of strontium-90 in cow's milk by 13,9 and 20,0 %, respectively. The most effective form of using vitamin D to reduce the transition of strontium-90 from the diet to milk is injecting the vitamin into animals. The research was conducted in the territory of radioactive contamination of the Republic of Belarus as part of the sixth State Program to overcome the consequences of the Chernobyl disaster for 2021–2025.

Keywords: vitamin D, calcium, absorption, strontium-90, milk.

Введение. На территории радиоактивного загрязнения Беларуси при поступлении стронция-90 в животноводческую продукцию защитное действие кальция заключается в том, что кальций является ближайшим химическим аналогом стронция и на основании этого может в известных пределах снижать всасывание стронция при их одновременном поступлении в желудочно-кишечный тракт сельскохозяйственных животных и птицы. Данный фактор, препятствующий всасыванию стронция в пищеварительной системе, получил название «дискриминация стронция в пользу кальция». Он проявляется в том, что при одновременном поступлении кальция и стронция организм предпочитает первый из них [1].

К настоящему времени хорошо изучена регулирующая роль витамина D в обмене кальция и фосфора в организме. Витамин D участвует в процессах всасывания кальция и фосфора в кишечнике (тонкий отдел) и тем самым обеспечивает повышение их концентраций, как в крови, так и отложение в костной ткани. Известно несколько форм этого витамина, но наиболее активны две из них: D₂ (эргокальциферол) и витамин D₃ (холекальциферол) [2], [3].

Витамин D отличается способностью накапливаться в организме, что имеет большое профилактическое значение. Особенно это важно для лактирующих животных. Дефицит в организме витамина D вызывает недостаточное поступление из кишечника в кровяное русло кальция и одновременно увеличение всасывания стронция-90 [1], [2], [4].

Ученые опытным путем определили норму ввода витамина D в рационы различных сельскохозяйственных животных. Так, например, норма ввода витамина D в рацион лактирующих коров установлена в количестве около 1,5 тыс. международных единиц (МЕ) на 1 кг сухого вещества (СВ) корма в первые 100 дней лактации и 1,4 тыс. МЕ на 1 кг СВ с 101-го по 305-й день лактации. В соответствии с рекомендациями справочного пособия «Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных» [5] в кормосмеси необходимо включать витамин D в следующих количествах: для сухостойных коров живой массой 600 кг и плани-

руемой продуктивностью 7–8 тыс. кг молока в год – 1,2 тыс. МЕ на 1 энергетическую кормовую единицу (ЭКЕ), для новотельных коров с суточным удоем 30 кг – 0,9 тыс. МЕ на 1 ЭКЕ, для лактирующих коров с суточным удоем 15–20 кг – 0,8 тыс. МЕ на 1 ЭКЕ.

Исследования проводились в рамках выполнения шестой Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 гг.

Цель работы – изучить уровни содержания кальция в кормах и рационе, витамина D в организме лактирующих коров и стронция-90 в молоке в зимне-стойловый период при разных способах дачи витамина D.

Материал и методы. Объекты исследования – поголовье лактирующих коров, корма и рационы кормления, показатели содержания витамина D в крови, стронция-90 в кормах и молоке.

Методы исследования – зоотехнический, биохимический, радиометрический, аналитический, статистический и др. [6], [7], [8].

Радиохимическое определение стронция-90 в исследуемых пробах проводилось на аттестованном низкофоновом α - β счетчике «Canberra-S5E» с погрешностью не более 20 %.

Определение содержания макро- и микроэлементов (Ca, K, Na, Fe, Mg, Mn, Zn, Co, Cu, Pb, Cd) в пробах кормов, молока и сыворотки крови было выполнено при помощи атомно-абсорбционного спектрометра Solaar M6.

Кровь отбирали для получения сыворотки утром до кормления животных. Для исследования брали по 7–10 мл крови от крупного рогатого скота. Определение содержания витаминов D₂ и D₃ в сыворотке крови проводилось при помощи обращенно-фазной высокоэффективной жидкостной хроматографии в ультрафиолетовом диапазоне на оборудовании фирмы Agilent Technologies (США) серии 1100.

Полученный цифровой материал подвергался математической и статистической обработке с использованием следующих программ: «Microsoft Excel», «Statistica». Оценка достоверности разницы проверялась по Стьюденту. Разницу считали достоверной при $P < 0,05$; $P < 0,01$; $P < 0,001$ [9].

Результаты исследований и их обсуждение. С целью определения питательности рационов и уровней содержания витамина D в рационах коров и организме животных в период зимне-стойлового содержания был проведен научно-хозяйственный эксперимент на базе МТФ «Дублин» ОАО «Маложинский» Брагинского района Гомельской области в период с 30 марта по 28 апреля 2023 г. (таблица 1).

Таблица 1 – Схема эксперимента

Группа животных	Количество голов в группе	Продолжительность эксперимента, сут.	Особенности кормления
Контрольная группа	10	30	ОР
1-я опытная группа	10		ОР + витамин D ₃ (перорально 10 мл на 1 голову в сутки; 500 000 МЕ/л)
2-я опытная группа	10		ОР + витамин D (инъекционно на 1-е; 10-е; 20-е сутки, препарат «Мультивит + минералы», с содержанием D ₃ – 25 000 МЕ/мл)

Примечание: ОР – основной рацион (сено злаковое – 3 кг/гол/сут; силос кукурузный – 12 кг/гол/сут; концентраты (ячмень – 50 %, овес – 50 %) – 2,4 кг/гол/сут).

Содержание и уход за животными опытной и контрольной групп были одинаковые, и соответствовали принятой на молочно-товарной ферме технологии содержания лактирующих коров, а также организации труда.

Животным перорально и инъекционно вводили витамин D в виде раствора (препарат «Чиктоник» в количестве 10 мл с кормом, содержание витамина D₃ – 500 000 МЕ/л) и внутримышечно (препарат «Мультивит + минералы», с содержанием D₃ – 25 000 МЕ/мл).

Таблица 2 – Химический состав и питательность рациона лактирующих коров живой массой 500–550 кг, со среднесуточным удоем молока жирностью 3,8–4 % – 8 кг

Показатели химического состава и питательности	Корма			Факт	Норма	Баланс (+/-)	
	Сено злаковое	Силос кукурузный	Концентраты			кг/г/мг	%
Суточное потребление кормов, кг	3	12	2,4				
Кормовые единицы, кг/кг	0,46	0,27	1,13	7,2	8,8	-1,6	-17,7
Обменная энергия, МДж/кг	6,97	2,88	11,45	83,0	107,0	-24,1	-22,5
Сухое вещество, кг/кг	0,87	0,32	0,84	8,4	11,9	3,5	-29,4
Сырой протеин, г/кг	126,4	24,50	101,0	915,5	1280,0	-364,5	-28,5
Переваримый протеин, г/кг	84,08	11,05	69,9	552,6	827,0	-274,4	-33,2
Сырая клетчатка, г/кг	321,25	112,35	78,5	2500,4	3008,0	-507,7	-16,9
Сахара, г/кг	14,42	3,31	36,85	171,4	538,0	-366,6	-68,1
Поваренная соль, г	–	–	–	58,0	58,0	0	0
Кальций, г/кг	7,37	1,88	2,2	49,9	59,0	-9,1	-15,5
Фосфор, г/кг	1,69	0,89	5,0	27,8	41,0	-13,3	-32,3
Магний, г/кг	3,48	1,01	1,35	25,8	21,0	4,8	22,9
Калий, г/кг	3,31	2,61	5,20	53,7	70,0	-16,3	-23,2
Железо, мг/кг	93,74	93,03	61,3	1544,6	688,0	856,6	124,5
Медь, мг/кг	1,94	1,50	3,45	32,1	75,0	-42,9	-57,2
Цинк, мг/кг	6,99	5,78	29,5	161,1	491,0	-329,9	-67,2
Кобальт, мг/кг	0,01	0,01	0,08	0,3	6,0	-5,7	-94,9
Марганец, мг/кг	0,06	0,02	40,0	96,3	491,0	-394,7	-80,4
Вит. D, тыс. МЕ	0,266	0,032	–	1,2	10,7	-9,5	-88,9

Представленный рацион имеет низкую сбалансированность по большинству нормируемых показателей. В рационе выявлен существенный дефицит отдельных значимых питательных веществ. Так, дефицит кормовых единиц составил 17,7 %, обменной энергии – 22,5 %, сырого и переваримого протеинов – 28,5 и 33,2 % соответственно, сахара – 68,1 %, кальция – 15,5 %, фосфора – 32,3 %, калия – 23,2 %, меди – 57,2 %, цинка – 67,2 %, кобальта – 94,9 %, марганца – 80,4 %. Вследствие не соответствия содержания питательных веществ норме, кальций-фосфорное отношение в рационе составляло 1,8:1, но которое в период лактации должно быть как 1,5–2:1. Сахаро-протеиновое отношение имело вид 1:0,3. В норме у крупного рогатого скота в среднем сахаро-протеиновое отношение 1:1, то есть на 1 грамм сахара должно приходиться 1 грамм протеина.

В связи с тем, что между содержанием кальция в кормах, витамина D в организме и поступлением стронция-90 в продукцию существует взаимосвязь, в рамках исследований был проведён анализ содержания кальция в основных кормах пострадавших районов Гомельской области. На рисунке представлены результаты анализа среднего содержания кальция в основных видах кормов сельскохозяйственных предприятий Гомельской области, расположенных на территории радиоактивного загрязнения.

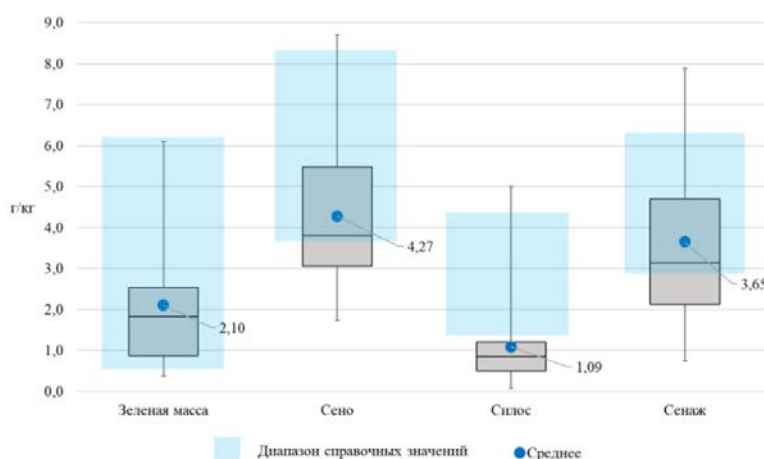


Рисунок – Анализ содержания кальция в основных видах кормов

Из показателей данных рисунка следует, что если содержание кальция в зелёной массе (в среднем 2,1 г/кг) укладывается в диапазон справочных значений, в сене (4,27 г/кг) и сенаже (3,65 г/кг) только часть его показателей находится ниже нижнего предела, то в силосе (1,09 г/кг) полностью выходит за нижний предел [5], [7].

Исследуемый рацион характеризуется крайне низким содержанием витамина D, дефицит которого (в сравнении с рекомендуемой нормой кормления) находился на уровне 88,9 %.

За время эксперимента проведено четырёхкратное изучение содержания витамина D в сыворотке крови контрольной и опытных групп, получавших витамин D₃ в виде масляного раствора (перорально) и в виде инъекции (внутримышечно).

В таблице 3 приведены данные по содержанию витамина D в сыворотке крови подопытных групп животных.

Таблица 3 – Результаты определения содержания витамина D в сыворотке крови подопытных животных, нг/мл

Группа животных	Витамины	Дата отбора			
		31.03.2023	06.04.2023	13.04.2023	20.04.2023
Контрольная	D ₂	8,88 ± 4,75	7,49 ± 3,35	3,22 ± 0,65	5,51 ± 1,33
	D ₃	4,16 ± 0,58	8,69 ± 5,96	6,08 ± 1,61	5,1 ± 1,27
	D ₂ + D ₃	13,04	16,18	9,30	10,61
1-я опытная ¹	D ₂	4,63 ± 1,2	8,22 ± 4,74	4,25 ± 1,52	10,54 ± 5,23*
	D ₃	3,84 ± 1,42	6,83 ± 4,47	6,71 ± 3,75	8,2 ± 3,78*
	D ₂ + D ₃	8,47	15,05	10,96	18,74
2-я опытная ²	D ₂	4,94 ± 1,79	8,59 ± 4,56	2,91 ± 0,79	5,96 ± 2,54
	D ₃	5,79 ± 3,26	27,01 ± 9,49**	13,55 ± 4,37**	14,63 ± 5,38**
	D ₂ + D ₃	10,73	35,60	16,46	20,59

Примечание: * – P < 0,05; ** – P < 0,001; ¹ – перорально; ² – инъекционно.

Из полученных данных следует, что при внутримышечном введении витамина сумма концентраций D₂ + D₃ на 6 сутки проведения эксперимента увеличилась до 35,6 нг/мл или в 2,2 раза в сравнении с контролем. При пероральном введении (с кормом) увеличение содержания витамина до 18,74 нг/мл или в 1,8 раза к контролю отмечено в конце проведения эксперимента. На основании этих результатов можно сделать вывод, что наиболее эффективным способом применения витамина животным является внутримышечное введение.

Проведенные радиометрические исследования удельной активности стронция-90 в кормах, включенных в состав рациона, показало их полное соответствие требованиям, предъявляемым РДУ-99 [8]. Так, содержание стронция-90 в сене находилось в пределах 20,39–199,69 Бк/кг, силоса – 6,12–10,82 Бк/кг. Суточная активность стронция-90 в рационе подопытных коров на протяжении всего периода проведения эксперимента составляла 0,13–0,73 кБк.

Радиометрические исследования отобранных проб молока в нулевые сутки эксперимента показали результаты измерений стронция-90 на уровне 1,23 ± 0,34 Бк/кг (таблица 4).

Таблица 4 – Удельная активность стронция-90 в молоке коров, Бк/кг

Номер отбора	Группа животных	Способ поступления витамина D	Результаты измерений, Бк/кг
0-й отбор	–	–	1,23 ± 0,34
1-й отбор	Контрольная	–	1,09 ± 0,3
	1-я опытная	перорально	1,13 ± 0,31
	2-я опытная	инъекционно	0,92 ± 0,26
2-й отбор	Контрольная	–	1,2 ± 0,33
	1-я опытная	перорально	1,44 ± 0,4
	2-я опытная	инъекционно	1,41 ± 0,39
3-й отбор	Контрольная	–	1,8 ± 0,49
	1-я опытная	перорально	1,55 ± 0,42
	2-я опытная	инъекционно	1,44 ± 0,4

В последующих отборах динамика изменения удельной активности молока коров контрольной группы составляла 1,09–1,8 Бк/кг, в 1-й опытной – 1,13–1,55 Бк/кг, во 2-й опытной – 0,92–1,44 Бк/кг. В заключительном периоде проведения эксперимента (3-й отбора проб молока) полученные результаты свидетельствуют о наибольшем снижении содержания стронция-90 в молоке коров 3-й опытной группы, получавшей витамин D инъекционно, в результате чего содержание изучаемого радионуклида в молоке снизилось на 20,0 % (до 1,44 Бк/кг) по сравнению с контролем (1,8 Бк/кг). В 1-й опытной группе, получавшей витамин D вместе с кормом (перорально), снижение удельной активности молока по сравнению с контролем составило 13,9 % (до 1,55 Бк/кг).

Заключение. Питательность силосно-сенного рациона имеет низкую сбалансированность по большинству нормируемых показателей. В рационе выявлен существенный дефицит питательных веществ. Так, дефицит кормовых единиц составил 17,7 %, обменной энергии – 22,5 %, сырого и переваримого протеинов – 28,5 и 33,2 % соответственно, сахара – 68,1 %, кальция – 15,5 %, фосфора – 32,3 %, калия – 23,2 %, меди – 57,2 %, цинка – 67,2 %, кобальта – 94,9 %, марганца – 80,4 %, витамина D – 88,9 %. Применение препаратов витамина D вместе с кормом и инъекционно, на фоне его дефицита в рационе, способствует снижению поступлению стронция-90 в молоко коров на 13,9 и 20,0 % соответственно. Наиболее эффективной формой использования витамина D для снижения перехода стронция-90 из рациона в молоко является инъекционное введение витамина животным.

Литература

1. Сельскохозяйственная радиология / Под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. – М. : Экология, 1991. – 227 с.
2. Физиология сельскохозяйственных животных / А. П. Костин [и др.]. – М. : Колос, 1974. – 480 с.
3. Полноценное кормление высокопродуктивных коров / А. Ф. Карпенко [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 430 с.
4. Разумовский, Н. Балансируем рационы скота по минералам / Н. Разумовский // Животноводство России. – 2023. – № 1. – С. 53–55.
5. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных : справ. пособ. – М. : Агропромиздат, 1985. – 352 с.
6. Гусаров, И. В. Система нормированного кормления высокопродуктивных коров с учетом их биохимического статуса / И. В. Гусаров, О. Д. Обряева // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. – 2021. – № 12 (197). – С. 23–39.
7. Шпаков, А. П. Кормовые нормы и состав кормов : справ. пособ. / А. П. Шпаков, В. В. Назаров, К. Л. Певзнер. – Минск : Ураджай, 1991. – 384 с.
8. 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.
9. Рокицкий, П. Л. Биологическая статистика / П. Л. Рокицкий. – Минск : Выш. шк., 1973. – 318 с.

¹Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

²Институт радиобиологии НАН Беларуси

Поступила в редакцию 28.03.2025

Влияние биопрепарата Грамисил в посевах озимого ячменя на агрономически ценные группы почвенных микроорганизмов

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

В полевом опыте на основании выполненного микробиологического исследования биопрепарата Грамисил, используемого в качестве прикорневой подкормки (в двух сроках: осенний и весенний) в посевах озимого ячменя, культивированного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, установлено: полученные значения эколого-трофических коэффициентов свидетельствуют, что направленность процессов превращения органической биомассы на всех стадиях ее преобразования не зависит от сроков внесения биопрепарата.

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

In the field experiment on the basis of microbiological study of Gramisil biopreparation used as a root dressing (in two periods: autumn and spring) in winter barley crops cultivated on sod-podzolic light loamy soil, it was established that the obtained values of the ecological-trophic coefficients indicate that the direction of transformation processes of organic biomass at all stages of its transformation does not depend on the timing of the biopreparation application.

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

Введение. Препарат микробный Грамисил разработан институтом микробиологии НАН Беларуси. Основа препарата – азотфиксирующие и фосфатсольбилизирующие эндофитные бактерии, обладающие взаимодополняющими агрономически ценными свойствами: азотфиксацией, фосфатсольбилизацией, способны синтезировать гетероауксин (ИУК) и продуцировать АЦК-деаминазу [1]. Его состав содержит общий титр жизнеспособных клеток не менее *Rahnella aquatilis* В-1916Д (азотфиксирующий штамм) – 1×10^9 клеток/мл; *Pseudomonas brassicacearum* БИМ И-1917Д (фосфатмобилизующий штамм) – 1×10^9 клеток/мл [2]. В начальных тестах на озимой пшенице разработчиками определена эффективность действия препарата Грамисил. Установлено, что он существенно увеличивает численность фосфатсольбилизирующих и азотфиксирующих микроорганизмов в фазе колошения-цветения в среднем в 13 раз, высоту растений – на 25 %, сырой вес – в 2 раза, повышает стрессоустойчивость и урожайность в среднем на 33 % [1]. Другие сведения по изучению эффективности использования препарата Грамисил в литературе отсутствуют.

На сегодняшний день для получения здоровой почвы и, соответственно, конкурентно-способного урожая применяется альтернативный подход, называемый устойчивым сельским хозяйством. Это научное и производственное направление неопасно для окружающей среды и, самое важное, способствует длительному во времени поддержанию баланса в почвенной экосистеме. В связи с этим применение в сельском хозяйстве микробных препаратов, содержащих в своем составе микроорганизмы, например, растворяющие фосфаты, представляет собой по сравнению с использованием минеральных удобрений экологически безопасный метод [3], [4].

В обзорном исследовании [5] рассмотрены многочисленные экспериментальные работы, выполненные учеными разных стран мира на тему эффективного управления почвенными микробными сообществами с целью повышения плодородия почв. При этом подчеркнуто, что производители биопрепаратов заинтересованы в исследованиях по выявлению позитивного влияния от использования микробных препаратов на плодородие в агробиоценозах. Авторы ссылаются на ряд тестирований коммерческих микробных препаратов, которые указывают на отсутствие воздействия этих инокулянтов, например, на повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Объяснение такого результата, как указывают исследователи [5], состоит в том, что тестирование биопрепаратов чаще всего выполняется только в лабораториях либо в вегетационных экспериментах, без перехода к реальным полевым опытам.

Кроме того, практически не анализируется почвенный микробиом в нативном состоянии и при внесении микроорганизмов в составе биопрепаратов в конкретных полевых почвенных условиях. В связи с вышесказанным несомненна актуальность темы текущего исследования.

Цель работы – изучение влияния препарата микробного Грамисил на взаимоотношения между почвенными микроорганизмами основных эколого-трофических групп в полевых посевах ярового ячменя, культивированного на почве Гомельского региона республики.

Методы исследования. Исследования выполняли в осенне-весенний период 2023–2024 гг. на землях агрокомбината «Южный» вблизи н.п. Лопатино Гомельского района Гомельской области. Объектом исследований являлась биологическая активность агрономически ценных групп микроорганизмов при обработке микробным биопрепаратом Грамисил в посевах озимого ячменя сорта «Буслик».

Опыт был заложен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на посевах озимого ячменя сорта «Буслик»:

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

2) обработка посевов озимого ячменя микробным биопрепаратом Грамисил (опыт (о)). В эксперименте изучали два срока внесения биопрепаратов: 1) в осенний период – в фазу начало кущения; 2) в весенний период – в фазу кущения; с нормой расхода биопрепарата, равной 3 л/га.

Агрохимическая характеристика почвы следующая: рН в KCl – 5,9; фосфор – 280 мг/кг; калий – 268 мг/кг. Площадь опытных делянок составляла 5 м², размещение рендомизировано: повторность опытов – 4-х кратная.

Микробиологическое исследование почвы определяли в соответствии с методами, принятыми в почвенной микробиологии [6]–[9]. Отбор почвенных образцов выполняли по следующим фазам роста и развития озимого ячменя: кущения, выход в трубку, созревания (восковая спелость). При анализе влияния микробного препарата Грамисил на микробоценоз культивируемой почвы использовали чашечный метод Коха [6], суть которого состоит в культивировании почвенных микроорганизмов на агаризованных селективных питательных средах для выявления представленности микроорганизмов основных эколого-трофических ниш [7]. Численность таких микроорганизмов определяли в колониеобразующих единицах (КОЕ) при пересчете на 1 г абсолютно сухой почвы. Влажность дерново-подзолистой почвы устанавливали термостатно-весовым методом в соответствии с ГОСТом [8]. Расчет эколого-физиологических индексов и коэффициентов осуществляли согласно рекомендациям научно-методического пособия [7].

Полученные в опыте первичные биологические данные обрабатывали статистически при применении программы Excel 2010. Сравнение анализируемых показателей между контрольными и опытными группами определяли с использованием t-критерия Стьюдента. Нулевую гипотезу при уровне статистической значимости $P < 0,05$ отвергали [10]. Данные в таблице приведены в виде $M \pm m$, где M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего арифметического.

Результаты исследования и их обсуждение. Проанализируем метеоусловия в вегетационный период 2024 г. [11]. В апреле среднесуточная температура воздуха в первых двух декадах была выше нормы, в третьей декаде – чуть ниже нормы (на 1 °С), в среднем по месяцу – около 10 °С. На протяжении всех трех декад месяца отмечалось избыточное увлажнение, особенно в третьей декаде. Осадки выпадали в виде дождя. В мае наблюдали небольшие положительные отклонения температуры воздуха от нормы (на 0,7 °С). Очень теплой была третья декада с положительной аномалией равной 4,5 °С. На протяжении всех трех декад месяца установлен значительный дефицит осадков. В июне средняя температура воздуха всех трех декад была выше нормы. Количество осадков в среднем составило 97 мм или 139 % нормы. В июле среднесуточная температура воздуха первых двух декад месяца была выше нормы, третья декада по температурному режиму была близка к норме. Очень теплой выдалась вторая декада с положительной аномалией 4,2 °С. Среднемесячная среднесуточная температура колебалась от 19,6 до 23,0 °С. Количество осадков составило 82 мм или 84 % нормы.

Из вышесказанного следует отметить по месяцам неравномерность выпадения осадков, что, несомненно, могло негативно повлиять на развитие микроорганизмов почвы [9], [12]. Изменения значений влажности почвы менялись в полном соответствии с климатическими характеристиками анализируемого вегетационного периода. В частности, показатель влаж-

ности почвы, отобранной в ноябре 2023 г. и в конце апреля 2024 г., составил 23,5–29,2 % (таблица 1), что свидетельствует об оптимальном водном режиме почвы. При отборе почвы в мае выявлено снижение влажности почвы до 12,5 % для контрольного образца и 8,3–10,9 % – для опытных образцов. Для июльских образцов почвы (к3 и о3) из группы вариантов «осеннее внесение биопрепарата» влажность почвы находилась на уровне предыдущего срока отбора и составляла 9,6–11,2 %. В тоже время на этот срок по сравнению с предыдущим периодом отбора для образцов почвы из группы «весеннее внесение биопрепарата» установлено существенное снижение показателя влажности почвы более чем в 7 раз для контрольного образца и незначительное снижение до 7,8 % – для опытного образца (таблица 1). Напоминаем, что в июле количество осадков составило 84 % нормы.

Таблица 1 – Коэффициент влажности почвы, %

Срок внесения биопрепарата	к нач.	Фаза кущения		Фаза выход в трубку		Фаза восковой спелости	
		к1	о1	к2	о2	к3	о3
осеннее	23,5	27,7	29,2	12,5	10,9	9,6	11,2
весеннее	23,5	–	–	12,5	8,3	1,6	7,8
сроки отбора почвы	08.11.2023	25.04.2024		31.05.2024		25.07.2024	

Почвенная вода, несомненно, наиболее важная характеристика почвы, поскольку определяет жизнедеятельность обитающих там представителей флоры и фауны. Важное значение имеет количество осадков на протяжении года и в первую очередь вегетационного периода. Большую часть воды из почвы потребляют растения, поэтому оптимальное увлажнение почвы определяет продуктивность сельскохозяйственных растений.

Численность представителей микробоценоза почвы при осеннем внесении биопрепарата Грамисил представлена в таблице 2. При анализе данных отмечено, что в фазу кущения озимого ячменя в опытном образце почвы по сравнению с контрольным образцом выявлено существенное увеличение численности микроорганизмов, включая бактерии, актиномицеты и микромицеты. В первую очередь это представители зимогенной экологической ниши, которая в том числе включает микромицеты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что биопрепарат Грамисил в фазе кущения активно стимулирует разложение свежего органического вещества, в первую очередь растительного происхождения. На это указывает значимое повышение значения КОЕ/г для целлюлозолитических микроорганизмов в 1,6 раза и микромицетов – в 2,6 раза.

На следующих этапах вегетации озимого ячменя в почвенных образцах установлено значимое снижение по сравнению с контролем численности микроорганизмов-аммонификаторов и представителей амилалитических микроорганизмов.

Среди представителей олиготрофной экологической ниши влияние биопрепарата Грамисил отмечали на стадиях: фаза выхода в трубку и фаза восковой спелости. В конце мая численность фосфатмобилизирующих бактерий в опытном варианте достоверно снижалась в 5 раз, но в июле, наоборот, возрастала почти в 3 раза. Отмечено существенное увеличение азотфиксаторов (олигонитрофильные бактерии) в 1,7 и 1,4 раза, соответственно, по стадиям роста ячменя. В опытных образцах почвы, отобранных в обеих анализируемых фазах роста злака, наблюдали стабильное подавление роста представителей олигокарбофильных микроорганизмов, которые отвечают за усвоение безазотистых углеродсодержащих органических соединений. Следует упомянуть, что олиготрофная микрофлора является преемницей процессов минерализации, активированной микроорганизмами зимогенной экологической ниши, основная ее функция – завершение превращения свежего органического вещества. Как известно, зимогенная и олиготрофная часть микрофлоры почвы составляют единую группу сапротрофов, поскольку разлагают в разной степени превращения мертвое органическое вещество из остатков растений и животных [7].

Для автохтонных микроорганизмов в опытных образцах почвы, отобранных в фазу выхода в трубку и фазу восковой спелости, установлено по сравнению с контрольными значениями достоверное снижение численности бактерий, соответственно, в 1,7 и 2,1 раз (таблица 2). В отношении автохтонной микрофлоры следует упомянуть, что ее представители – это коренное сообщество микроорганизмов почвы разных таксономических групп, изначально и

постоянно в ней присутствующие. В условиях агроценоза эта часть микроскопических организмов выполняет двойную функцию. С одной стороны, они синтезируют гумусоподобные соединения, с другой стороны, подвергают гумус деструкции.

Таблица 2 – Численность представителей микробоценоза почвы при осеннем внесении биопрепарата Грамисил в посевах ячменя, КОЕ/г абс.сух. почвы $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	к нач.	Фаза кущения		Фаза выход в трубку		Фаза восковой спелости	
		к1	о1	к2	о2	к3	о3
зимогенная экологическая ниша							
аммонифицирующие	45,6 ± 1,4	30,5 ± 3,7	46,2 ± 4,5*	34,2 ± 0,6	16,0 ± 1,2*	33,0 ± 0,3	39,8 ± 7,0
споровые аммонификаторы	4,6 ± 0,4	3,5 ± 0,8	4,9 ± 1,1	2,7 ± 0,4	3,4 ± 0,2	3,3 ± 0,2	2,2 ± 0,2*
амилолитические	40,5 ± 5,0	30,9 ± 0,3	50,1 ± 4,2*	117,0 ± 8,0	30,24 ± 0,7*	54,2 ± 6,0	35,8 ± 2,5*
целлюлозолитические	65,5 ± 5,2	58,3 ± 3,1	92,5 ± 4,9*	63,4 ± 5,5	81,2 ± 0,8*	93,8 ± 7,2	76,8 ± 7,3
олиготрофная экологическая ниша							
фосфатмобилизующие бактерии	2,0 ± 0,3	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,04 ± 0,01*	0,07 ± 0,02	0,2 ± 0,02*
олигонитрофильные	30,2 ± 5,8	34,0 ± 1,8	30,0 ± 0,9	25,7 ± 4,0	41,9 ± 5,3*	25,1 ± 1,9	34,0 ± 2,5*
олигокарбофильные	45,5 ± 1,7	54,2 ± 4,7	68,9 ± 3,2	54,2 ± 1,5	42,1 ± 0,7*	53,5 ± 4,7	40,9 ± 4,7*
автохтонная экологическая ниша							
автохтонные. Олиготрофы	52,0 ± 4,9	49,0 ± 6,1	53,7 ± 3,1	77,9 ± 13,5	46,2 ± 11,7*	53,2 ± 4,2	25,0 ± 1,6*
миксотрофно-синтетическая экологическая ниша							
микрмицеты, × 10 ³	0,03 ± 0,01	9,7 ± 2,1	26,3 ± 5,4*	6,9 ± 0,3	4,5 ± 0,5*	4,6 ± 0,7	2,4 ± 0,5*

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

Данные по средним значениям КОЕ/г представителей разных экологических ниш микроорганизмов почвы при весеннем внесении биопрепарата Грамисил в посевах ячменя отражены в таблице 3. Анализ данных показал в опытном варианте по сравнению с соответствующим контрольным образцом почвы, отобранных в фазе выхода в трубку, существенное снижение численности микроорганизмов-аммонификаторов, амилолитической группы, микробицетов, соответственно, в 1,3; 3,4; 1,7 раза. Для почвы, отобранной в фазе восковой спелости озимого ячменя, по большинству из тестируемых групп микроорганизмов отмечали в опытном образце достоверное в два и более раза повышение значения КОЕ/г. Сказанное касается представителей всех экологических ниш: зимогенной, олиготрофной и автохтонной, которые напрямую участвуют в превращении органического вещества почвы. Исключение относится к фосфатмобилизующим бактериям, количество которых в опытном варианте снизилось в 1,9 раз по сравнению с данными опытного образца почвы.

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

Группа микроорганизмов	к нач.	Фаза выход в трубку		Фаза восковой спелости	
		к2	о2	к3	о3
зимогенная экологическая ниша					
аммонифицирующие	45,6 ± 1,4	34,2 ± 0,6	26,0 ± 1,3*	10,1 ± 4,1	37,5 ± 3,7*
споровые аммонификаторы	4,6 ± 0,4	2,7 ± 0,4	2,8 ± 0,3	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,2
амилолитические	40,5 ± 5,0	117,0 ± 8,0	33,7 ± 1,7*	22,5 ± 1,8	63,2 ± 4,2*
целлюлозолитические	65,5 ± 5,2	63,4 ± 5,5	54,1 ± 0,9	37,1 ± 0,2	88,7 ± 11,4*
олиготрофная экологическая ниша					
фосфатмобилизующие бактерии	2,0 ± 0,3	0,2 ± 0,1	0,17 ± 0,04	0,13 ± 0,06	0,07 ± 0,02*
олигонитрофильные	30,2 ± 5,8	25,7 ± 4,0	24,7 ± 0,4	29,6 ± 3,0	28,3 ± 5,7
олигокарбофильные	45,5 ± 1,7	54,2 ± 1,5	63,9 ± 1,7	21,6 ± 0,9	43,8 ± 6,9*
автохтонная экологическая ниша					
автохтонные. Олиготрофы	52,0 ± 4,9	77,9 ± 13,5	74,1 ± 2,5	14,5 ± 2,2	39,2 ± 2,5*
миксотрофно-синтетическая экологическая ниша					
микрмицеты, × 10 ³	0,03 ± 0,01	6,9 ± 0,3	3,9 ± 0,4*	4,3 ± 0,4	5,5 ± 0,5

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

Необходимо подчеркнуть следующую особенность в распределении численности тестируемых групп микроорганизмов, наблюдаемую в полевом эксперименте: вне вегетационного периода (в ноябре) отмечена достоверно большая численность, до 2–50 раз, представителей фосфатмобилизирующих бактерий по сравнению с их количеством в весенне-летний период. С другой стороны, в этот период значение КОЕ/г для микромицетов, наоборот, снижено в 100 и более раз.

Рассмотрим влияние сроков внесения биопрепарата Грамисил (осенний и весенний сроки) на количественный состав и качественный спектр представителей почвенного микробоценоза в образцах почвы, отобранных в фазах выхода в трубку и восковой спелости озимого ячменя.

В отношении почвы опытных образцов, отобранных в фазе выхода в трубку, выявлена для представителей трех основных экологических ниш достоверно разная реакция показателя КОЕ/г, в зависимости от времени внесения биопрепарата (таблицы 2 и 3). В частности, целлюлозолитические бактерии (представители зимогенной экологической ниши) в количественном отношении представлены больше в образцах почвы из группы вариантов «осеннее внесение биопрепарата». Аналогичная реакция отмечена для олигонитрофильных бактерий, которые включены в олиготрофную экологическую нишу. В тоже время для других представителей почвенных микроорганизмов из группы вариантов «осеннее внесение биопрепарата», а именно: внутри олиготрофной экологической ниши (фосфатмобилизирующие бактерии и азотфиксаторы (олигонитрофильные)) и олиготрофы из автохтонной экологической ниши, установлено достоверное снижение их численности.

Касательно почвы опытных образцов из группы «весеннее внесение биопрепарата», отобранных в фазе восковой спелости, практически для всех анализируемых групп микроорганизмов отмечали достоверное повышение численности представителей в сравнении с контрольными значениями. В то время как в образцах из группы «осеннее внесение биопрепарата» для большинства представителей микробоценоза наблюдали снижение значения КОЕ/г в опытных образцах по сравнению с соответствующими контрольными образцами. Исключение составили фосфатмобилизирующие бактерии и олигонитрофильные бактерии.

Рассмотрим влияние биопрепарата Грамисил на эколого-трофические индексы и коэффициенты (таблица 4). Следует отметить, что на основании микробиологического анализа в отобранных в фазе кущения ячменя контрольном и опытном образцах почвы установлено активное протекание в этот период в исследуемом агроценозе и минерализационных, и иммобилизационных процессов, о чем свидетельствует коэффициент минерализации, равный, соответственно, 1,0 и 1,1. На этапе роста ячменя выход в трубку коэффициент минерализации равен 3,4, что, согласно [7], косвенно указывает на повышение скорости разложения гумуса. В опытных вариантах значения коэффициента, равные 1,9 и 1,3, позволяют утверждать о доминировании в обеих группах микроорганизмов иммобилизационных процессов. Необходимо указать, что для отобранной в фазе восковой спелости почвы из группы «весеннее внесение биопрепарата» в опытном и контрольном образцах сохраняется такая же тенденция в направлении метаболических реакций, как и в предыдущей фазе роста ячменя. В тоже время для опытной почвы из группы «осеннее внесение биопрепарата» коэффициент минерализации, равный 0,9, свидетельствует о незначительном усилении минерализационных процессов.

Таблица 4 – Влияние биопрепарата Грамисил на эколого-трофические индексы и коэффициенты

Показатели	К нач.	Фаза кущения		Фаза выход в трубку				Фаза восковой спелости			
		к1о	о1о	к2о	о2о	к2в	о2в	к3о	о3о	к3в	о3в
коэффициент минерализации	0,9	1,0	1,1	3,4	1,9	3,4	1,3	1,6	0,9	2,2	1,7
коэффициент педотрофности	1,1	1,6	1,2	2,3	2,9	2,3	2,9	1,6	0,6	1,4	1,1
индекс олиготрофности	1,0	1,8	1,5	1,6	2,6	1,6	2,5	1,6	1,0	2,1	1,2

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

Значение индекса олиготрофности, установленное при изучении почвенных образцов опытных вариантов, вне зависимости от сроков внесения биопрепарата Грамисил, имеет одинаковую направленность процессов (таблица 4). На стадиях роста ячменя фаза кущения и фаза восковой спелости в опытных вариантах почвы по сравнению с контролем активизируют-

ся процессы деструкции органического вещества. В тоже время для опытных почвенных образцов, отобранных в фазе выхода в трубку, отмечено замедление процессов деструкции, что может указывать на переход изучаемого микробоценоза в более устойчивое состояние, близкое к состоянию климаксовой системы. Следует упомянуть, что олиготрофная часть почвенного микробоценоза участвует в преобразовании промежуточного органического вещества до структур специфического органического вещества, включающих гуминовые кислоты, фульвокислоты, гумины, негидролизуемые остатки.

Значения коэффициента педотрофности (таблица 4), установленные на основании изучения опытных образцов почвы, отобранных в фазе выхода в трубку, свидетельствуют о большей устойчивости изучаемого биогеоценоза к негативным воздействиям по сравнению с контролем. В данный период замедление процессов деструкции органического вещества промежуточной стадии разложённости определяет снижение активности процессов превращения неспецифической органической части почвы через реакции поликонденсации и полимеризации в гумусовые вещества почвы. В свою очередь, для опытных образцов почвы, отобранных в фазах кушения и восковой спелости, усиление гумификации промежуточного вещества представителями олиготрофной микробной ниши инициирует увеличение процессов разложения, трансформации и продуцирования гумуса. Данные процессы существенно снижают устойчивость ценоза к негативным воздействиям со стороны прежде всего биотических факторов среды.

Заключение. На основании проведенного микробиологического исследования биопрепарата Грамисил, используемого в качестве прикорневой подкормки в фазе кушения (в двух сроках: осенний и весенний периоды) в посевах ярового ячменя, культивированного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве Гомельского региона республики, установлено: полученные значения эколого-трофических коэффициентов свидетельствуют, что направленность процессов превращения органической биомассы на всех стадиях ее преобразования не зависит от сроков внесения биопрепарата Грамисил. На основе изучения опытных образцов почвы, отобранных в фазе выхода в трубку, по сравнению с контрольными образцами установлено замедление процессов деструкции органического вещества промежуточной стадии разложённости и, соответственно, снижение синтеза и преобразования гумуса. В свою очередь, для опытных образцов почвы, отобранных в фазах кушения и восковой спелости, усиление гумификации промежуточного вещества представителями олиготрофной микробной ниши инициирует увеличение процессов разложения, трансформации и продуцирования гумуса. Значения индексов олиготрофности и педотрофности, установленные на основании изучения опытных образцов почвы, отобранных в фазу выхода в трубку, указывают на повышение стабилизации изучаемого биоценоза к негативным биотическим и абиотическим факторам среды при внесении биопрепарата Грамисил. В тоже время на стадии кушения и восковой спелости биоценоз опытного варианта характеризуется меньшей устойчивостью к внешним вмешательствам.

Литература

1. Грамисил [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://inmi.by/2023/09/06/gramisil/>. – Дата доступа : 20.01.2025.
2. Препарат микробный «Грамисил», ж [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pesticidy.by/mikrobiologicheskie-udobreniya/preparat-mikrobnyj-gramisil-zh/>. – Дата доступа : 20.01.2025.
3. Timofeeva, A. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture / A. Timofeeva, M. Galyamova, S. Sedykh // Plants. – 2022. – № 11. – P. 2119.
4. Кадырова, Г. Х. Фосфат-солюбилизирующая активность ризобактерий пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / Г. Х. Кадырова [и др.] // Universum : химия и биология : научн. журн. – 2022. – № 12 (102). – С. 22–27.
5. Чернова, Т. И. Управление почвенными микробными сообществами : возможности и перспективы / Т. И. Чернова, М. В. Семенова // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1506–1522.
6. Прудникова, С. В. Методы микроэкологического исследования наземных, водных и воздушных экосистем : учеб. пособ. для студ. высш. учеб. завед. / С. В. Прудникова [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2007. – 152 с.
7. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества : науч. метод. пособ. / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.

8. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений : ГОСТ 28268-89 ; введ. 01.06.1990. – М. : Стандартинформ, 2006. – 6 с.
9. Растениеводство : учеб. для вузов / Г. С. Посыпанов [и др.]. – М. : Изд-во «НИЦ ИНФРА-М», 2022. – 612 с.
10. Шеламова, М. А. Статистический анализ медико-биологических данных с использованием программы Excel : учеб.-метод. пособ. / М. А. Шеламова, Н. И. Инсарова, В. Г. Лещенко. – Минск : БГМУ, 2010. – 96 с.
11. Климатическая характеристика мая 2024 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pogoda.by/information/news/21916>. – Дата доступа : 20.01.2025.
12. Концевая, И. И. Влияние микробных удобрений на взаимоотношения основных экологотрофических групп почвенных микроорганизмов в посевах ярового ячменя в условиях засухи / И. И. Концевая [и др.] // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2024. – № 3 (144). – С. 46–51.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 24.01.2025

Видовой состав и таксономическая структура ассамблей жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) отвалов фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод»

А.Н. Крицкая

В статье дается обзор сообществ жуужелиц, обитавших на залежах отходов производства фосфорных удобрений на территории ОАО «Гомельский химический завод». Такие долгосрочные исследования позволяют составить более полную картину существования жуков в нетипичных условиях существования. Таким образом, статья представляет собой описание видового состава представителей семейства жуужелиц.

Ключевые слова: семейство жуужелиц, видовой состав, род, отвалы фосфогипса.

The article is an overview of the communities of ground beetles that lived on the deposits of phosphorus fertilizer production waste on the territory of Gomel Chemical Plant. Such long-term research makes it possible to create a more complete information of the existence of beetles in atypical living conditions. Thus, the article is a description of the species composition of the representatives of the ground beetle family.

Keywords: ground beetle family, species composition, genus, phosphogypsum dumps.

Введение. Почвенное население беспозвоночных животных не обходится без представителей семейства жуужелиц, которые чутко реагируют на различные изменения почвенно-растительных и микроклиматических условий, поэтому они используются как биоиндикаторы [1]. Помимо этого, они играют важную роль в численности других беспозвоночных животных, а также являются компонентом рациона позвоночных животных. Поэтому чаще всего не проходит исследование экосистем без изучения спектра видов данного семейства. Таких биоиндикаторов стоит отслеживать для понимания естественных экологических процессов в их жизнедеятельности, что способствует выявлению антропогенных изменений окружающей среды [2]. Целью нашего исследования было выявление видового состава и таксономической структуры представителей семейства жуужелиц, которые обитали на отвалах фосфогипса.

Материал и методы исследования. Сбор имаго жуужелиц проводился в три этапа: с 2006 по 2009 гг., с 2011 по 2013 гг. и в 2019 г. на территории концентрации отходов производства фосфорных удобрений (отвалов фосфогипса) ОАО «Гомельский химический завод». Исследования проводились на трех стационарах, которые располагались на отвалах фосфогипса с разной степенью проективного покрытия растительностью (1 % покрытия участка растительностью, 60–70 % и 90 %), а также на контрольном участке, находившийся в смешанном лесу. При этом верхний слой почвы на отвалах на глубину 5–10 см представлял собой сплошной слой фосфогипса. Рядом со стационарами располагался обводной канал. При помощи почвенных ловушек нами было собрано 1587 жуужелиц на отвалах фосфогипса и 1262 экземпляров на контрольном участке. Первичный учет данных велся при помощи электронных таблиц Calc офисного пакета Libre Office 7.6 (<https://www.libreoffice.org>). Таксономия семейства приведена по [3].

Результаты и их обсуждение. При рассмотрении таксономической структуры семейства жуужелицы, обитавшего на выбранных нами стационарах, было установлено, что жуки относились к 5 подсемействам (Cicindelinae, Omophroninae, Broscinae, Trechinae, Harpalinae) на стационаре «Отвал 1», к 7 подсемействам (Nebriinae, Cicindelinae, Carabinae, Scaritinae, Broscinae, Trechinae, Harpalinae) на стационаре «Отвал 2», к 6 подсемействам (Nebriinae, Carabinae, Scaritinae, Broscinae, Trechinae, Harpalinae) на стационаре «Отвал 3», а также к 6 подсемействам (Nebriinae, Carabinae, Loricarinae, Broscinae, Trechinae, Harpalinae) на контрольном участке (таблица 1).

В состав фауны жуужелиц, обитавших на наименее заросшем стационаре, вошло 17 видов из 9 родов и 8 триб (6 подтриб) общей численностью 93 экземпляра. Состав карабидо-комплекса, располагавшегося на территории с проективным покрытием растительностью 60–70 %, включал уже 35 видов из 15 родов и 13 триб общей численностью 366 экземпляров.

Наибольшим видовым богатством из отвалов отличался самый заросший стационар – 47 видов из 21 рода и 13 триб общей численностью 1128 экземпляров. При этом сообщество жужелиц на контрольном участке состояло из 54 видов из 23 родов и 15 триб общей численностью 1262 экземпляра. Из полученных данных можно выделить, что триба Notiophilini (подсемейство Nebriinae) характерна только для стационара «Отвал 2» и контрольного участка. В тоже время триба Cychrini (подсемейство Carabinae) и триба Panagaeini (подсемейство Harpalinae) характерны только для контрольного участка. Представители, относящиеся к трибе Trechini (подсемейство Trechinae), встречались только на самом заросшем стационаре. К трибе Platynini (подсемейство Harpalinae), в который входит три рода, относились представители стационара «Отвал 3» и контрольного участка. Таким образом, таксономическая структура позволяет оценить разнообразие карабидокомплекса на изучаемой территории.

Таблица 1 – Таксономическая структура жужелиц на изучаемой территории

Стационар	Подсемейства	Трибы	Подтрибы	Роды	Подроды	Виды
Отвал 1	5	8	6	9	13	17
Отвал 2	7	13	8	15	24	35
Отвал 3	6	13	12	21	31	47
Контроль	6	15	12	23	30	54

По результатам нашего исследования на стационаре «Отвал 1» было собрано 17 видов жужелиц (таблица 1 и 2). При этом род *Harpalus* оказался самым разнообразным и включал в себя 4 вида, хотя численность составила всего 9,68 % (таблица 2). Род *Bembidion* включал 3 вида с относительным обилием 13,98 %. В то же время род *Calathus*, *Cicindela* и *Pterostichus* включали по 2 вида каждый, хотя численность их значительно отличалась друг от друга – 10,75 %, 24,73 % и 5,38 % соответственно. В свою очередь представители рода *Amara*, *Anisodactylus* и *Omophron* были отмечены единично. Стоит отметить тот факт, что последний род был отмечен только на стационаре «Отвал 1». Кроме того, такие виды как *Anisodactylus nemorivagus*, *Bembidion femoratum*, *Cicindela hybrida*, *Harpalus flavescens* и *Omophron limbatus* фиксировались нами только на данной территории в связи с тяготением к открытым местообитаниям. Самым многочисленным оказался представитель рода *Broscus* – *Broscus cephalotes* 32,26 % от общей численности – типичный обитатель открытых пространств с сыпучим подстилающим субстратом.

Таблица 2 – Видовой состав и относительное обилие жужелиц исследованных стационаров

Вид	Отвал 1	Отвал 2	Отвал 3	Контроль
1	2	3	4	5
<i>Acupalpus flavicollis</i> (Sturm, 1825)	0	0	0,62	0,08
<i>Agonum fuliginosum</i> (Panz., 1800)	0	0	0,09	0,24
<i>Agonum sexpunctatum</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0,09	0,16
<i>Amara aenea</i> (DeGeer, 1774)	1,07	1,37	0,62	2,30
<i>Amara bifrons</i> (Gyllenhal 1810)	0	0	0	0,24
<i>Amara brunnea</i> (Gyllenhal, 1810)	0	0	0,35	0
<i>Amara communis</i> (Panzer, 1797)	0	2,19	0,09	0,55
<i>Amara consularis</i> (Duftschmid, 1812)	0	0,55	0	0
<i>Amara majuscula</i> (Chaudoir, 1850)	0	0,27	0	0
<i>Anisodactylus binotatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	0,09	0,08
<i>Anisodactylus nemorivagus</i> (Duftschmid, 1812)	1,07	0	0	0
<i>Asaphidion flavipes</i> (Linnaeus, 1761)	0	0	0,44	0,55
<i>Badister bullatus</i> (Schränk, 1798)	0	0	0,09	0,16
<i>Badister lacertosus</i> (Sturm, 1815)	0	0	0	0,16
<i>Badister unipustulatus</i> (Bonelli, 1813)	0	0	0,09	0,08
<i>Bembidion andreae polonicum</i> (G.Müller, 1930)	0	0,27	0	0
<i>Bembidion articulatum</i> (Panzer, 1797)	0	0	0,18	0
<i>Bembidion azurescens</i> (Dalla Torre, 1877)	0	0,27	0,09	0
<i>Bembidion femoratum</i> (Sturm, 1825)	1,07	0	0	0
<i>Bembidion lampros</i> (Herbst, 1784)	0	2,46	0,97	0,40
<i>Bembidion properans</i> (Stephens, 1827)	4,30	0,55	0	0

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
<i>Bembidion quadrimaculatum</i> (Linnaeus 1761)	8,60	3,55	4,25	0
<i>Bembidion varium</i> (Olivier, 1795)	0	0	0,27	0
<i>Broscus cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	32,26	0,27	0,18	0,08
<i>Calathus ambiguus</i> (Paykull, 1790)	0	0	0,44	0
<i>Calathus erratus</i> (C.Sahlb., 1827)	5,38	49,18	28,63	2,06
<i>Calathus fuscipes</i> (Goeze, 1777)	5,38	4,92	1,68	0,32
<i>Calathus melanocephalus</i> (Linnaeus, 1758)	0	4,64	0,09	1,19
<i>Calathus micropterus</i> (Duftschmid, 1812)	0	5,46	0,80	19,02
<i>Calosoma auropunctatum</i> (Herbst, 1784)	0	0	0,09	0
<i>Calosoma investigator</i> (Illiger, 1798)	0	0	0,09	0,08
<i>Carabus arvensis</i> (Herbst, 1784)	0	0	0,09	0
<i>Carabus cancellatus</i> (Illiger, 1798)	0	0	0,09	0,87
<i>Carabus glabratus</i> (Payk., 1790)	0	0	0	11,33
<i>Carabus granulatus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,82	0,80	2,93
<i>Carabus hortensis</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,55	0,35	3,96
<i>Carabus nemoralis</i> (Müller, 1764)	0	0	0	0,08
<i>Cicindela campestris</i> (Linnaeus, 1758)	12,90	3,55	0	0
<i>Cicindela hybrid</i> (Linnaeus, 1758)	11,83	0	0	0
<i>Cylindera germanica</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,27	0	0
<i>Curtonotus aulica</i> (Panzer, 1796)	0	0,55	0,09	0,08
<i>Cychrus caraboides</i> (Linné, 1758)	0	0	0	3,64
<i>Dyschirius arenosus</i> (Stephens, 1827)	0	0,55	0,27	0
<i>Epaphius secalis</i> (Paykull, 1790)	0	0	0,18	0
<i>Harpalus affinis</i> (Schränk, 1781)	0	0,82	0	0
<i>Harpalus anxius</i> (Duftschmid, 1812)	0	0	0	0,08
<i>Harpalus calceatus</i> (Duftschmid, 1812)	0	0	0	0,08
<i>Harpalus flavescens</i> (Piller et Mitterpacher, 1783)	4,30	0	0	0
<i>Harpalus latus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0,27	0,16
<i>Harpalus rubripes</i> (Duftschmid, 1812)	2,15	2,73	1,42	0,32
<i>Harpalus rufipes</i> (De Geer, 1774)	1,07	5,19	20,12	11,65
<i>Harpalus smaragdinus</i> (Duftschmid, 1812)	0	0	0	0,08
<i>Harpalus tardus</i> (Panzer, 1797)	2,15	0,55	1,33	0,32
<i>Leistus ferrugineus</i> (Linné 1758)	0	0	0	0,47
<i>Leistus rufescens</i> (Fabricius, 1775)	0	0,55	0,53	1,35
<i>Licinus depressus</i> (Paykull, 1790)	0	0,27	0	0
<i>Limnodropus assimilis</i> (Paykull, 1790)	0	0	0	0,08
<i>Loricera pilicornis</i> (Fabricius, 1775)	0	0	0	0,08
<i>Microlestes minutulus</i> (Goeze, 1777)	0	3,83	26,15	2,46
<i>Notiophilus aquaticus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,27	0	0,16
<i>Notiophilus palustris</i> (Duftschmid, 1812)	0	0,27	0	0,24
<i>Omophron limbatum</i> (Fabricius, 1777)	1,07	0	0	0
<i>Oxypselaphus obscurus</i> (Herbst, 1784)	0	0	0,97	1,74
<i>Panaqaeus bipustulatus</i> (Fabricius, 1775)	0	0	0	0,32
<i>Poecilus cupreus</i> (Linnaeus 1758)	0	0	0,44	0,71
<i>Poecilus lepidus</i> (Leske, 1785)	0	0,27	1,06	0,63
<i>Poecilus punctulatus</i> (Schaller, 1783)	0	0	0	0,08
<i>Poecilus versicolor</i> (Sturm, 1824)	0	1,37	0,62	9,67
<i>Pterostichus aethiops</i> (Panzer, 1797)	0	0	0	0,16
<i>Pterostichus aterrimus</i> (Herbst, 1784)	0	0	0	0,40
<i>Pterostichus melanarius melanarius</i> (Illiger, 1798)	0	0	0,62	1,50
<i>Pterostichus niger</i> (Schaller, 1783)	3,22	0,82	3,28	9,67
<i>Pterostichus nigrita</i> (Paykull, 1790)	0	0,27	0,18	0,08
<i>Pterostichus oblongopunctatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	0,27	5,39
<i>Pterostichus strenuus</i> (Panzer, 1797)	0	0,27	0,18	0,47
<i>Pterostichus vernalis</i> (Panzer, 1796)	0	0,27	0	0,24
<i>Pterostichus quadrioveolatus</i> (Letzner, 1852)	2,15	0	0	0
<i>Stenolophus mixtus</i> (Herbst, 1784)	0	0	0,27	0
<i>Synuchus vivalis</i> (Illiger, 1798)	0	0	0,09	0,79
Всего экземпляров	93	366	1128	1262
Всего видов	17	35	47	54

При обработке данных на стационаре «Отвал 2» было собрано 35 видов жужелиц (таблица 1 и 2). Видовое разнообразие родов *Amara* и *Bembidion* оказались наибольшим – по 5 видов каждый. При этом численность второго рода составила 7,10 % от общего количества: *Bembidion andreae* (был отмечен единично и только на данном стационаре), *B. azurescens* (был отмечен единично на данном стационаре, а также и на «Отвале 3»), *B. properans* (встречался также на стационаре «Отвал 1» – открытых солнечных местах), *B. lampros*, *B. quadrimaculatum*. Численность рода *Amara* составила 4,92 %, среди которых были виды, отмеченные только на изучаемой территории – *Amara consularis* и *A. majuscula*. Наиболее многочисленным оказался род *Calathus* – 64,21 %, который включал в себя 4 вида: *Calathus erratus*, *C. fuscipes*, *C. melanocephalus*, *C. micropterus*. Среди представителей рода *Harpalus*, относительное обилие которого составило 9,29 %, также встречались представители, отмеченные только на стационаре «Отвал 2» – *Harpalus affinis*. В том же ряду стоит и род *Pterostichus* – 4 вида, только обилие составило всего 1,64 %. Вместе с тем представители рода *Cicindela* встречались только на наименее заросшем и данном стационаре, что может быть связано с тем, что эти жесткокрылые предпочитают открытые места обитания с редкой растительностью. Кроме того, вид *Cylindera germanica* отмечался единично и только на данной территории. При этом род *Broscus* (*Broscus cephalotes*) и *Licinus* (*Licinus depressus*) были зафиксированы в крайне малом количестве. В свою очередь последний отмечался только на рассматриваемом стационаре. Такая низкая встречаемость характеризуется тем фактом, что данные виды предпочитают места с ограниченной растительностью. В условиях стационара с высокой степенью зарастания растительностью эти виды могут испытывать нехватку подходящих мест обитания, доступа к пище и укрытию, что может привести к их меньшему количеству. Также возможно, что подобные условия снижают конкурентоспособность данных видов относительно других животных, что также может сказаться на их численности.

В процессе анализа собранного материала по стационару «Отвал 3» было отмечено 47 видов (таблица 1 и 2). Такие роды, как *Bembidion*, *Calathus* и *Pterostichus* оказались наиболее разнообразны в видовом плане, как и на предыдущем стационаре – по 5 видов, хотя их численность составила 5,76 %, 31,65 % и 4,52 % соответственно. При этом жужелица *Bembidion quadrimaculatum* нами была отмечена на трех отвалах фосфогипса, что может быть связано с тем, что этот вид обитает на полях и в садах открытых мест обитания. Типично наиболее многочисленными оказались также род *Microlestes* (26,15 %) и *Harpalus* (23,14 %). Стоит обратить внимание, что род *Microlestes* представлен только одним видом *Microlestes minutulus*, который также нами был отмечен на стационаре «Отвал 2» и на контрольном участке, но в гораздо меньшем количестве. Единично представлены были род *Anisodactylus* (*Anisodactylus binitatus*) и *Synuchus* (*Synuchus vivalis*). Кроме того, отмечались виды, зафиксированные нами только на данном отвале: *Amara brunnea* (обилие особей всего рода составило 1,15 %), *Bembidion articulatum* (обилие особей всего рода составило 5,76 %), *B. varium*, *Calosoma auropunctatum* (обилие особей всего рода составило 0,18 %), *Carabus arvensis* (обилие особей всего рода составило 1,33 %), *Eraphius secalis* (обилие особей всего рода составило 0,18 %), *Stenolophus mixtus* (обилие особей всего рода составило 0,27 %).

На контрольном участке было выявлено 54 вида (таблица 1 и 2). Наиболее многочисленными оказались род *Calathus* (относительное обилие особей составило 22,58 %), *Carabus* (19,17 %), *Pterostichus* (17,9 %), *Harpalus* (12,67 %) и *Poecilus* (11,09 %). При этом видовое разнообразие наиболее широко представлено у рода *Pterostichus* – 8 видов и *Harpalus* – 7 видов. В свою очередь стоит выделить и самые многочисленные виды, обитавших на контрольном участке – *Calathus micropterus* (19,02 % от численности всех особей), *Harpalus rufipes* (11,65 %), *Carabus glabratus* (11,33 %), *Poecilus versicolor* (9,67 %) и *Pterostichus niger* (9,67 %). Нами было отмечено 6 родов, которые были представлены в крайне малом количестве: *Acupalpus*, *Anisodactylus*, *Broscus*, *Calosoma*, *Loricera* и *Limondromus*. Кроме того, последних два рода, а также *Cychrus* и *Panagaeus* нами были зафиксированы только на контрольном участке. Стоит добавить, что такие виды как *Amara bifrons*, *Badister bipustulatus*, *B. lacertosus*, *Carabus glabratus*, *C. nemoralis*, *Cychrus caraboides*, *Harpalus anxius*, *H. calceatus*, *H. smaragdinus*, *Leistus ferrugineus*, *Loricera pilicornis*, *Limondromus assimilis*, *Panagaeus bipustulatus*, *Poecilus punctulatus*, *Pterostichus aethiops*, *Pt. aterrimus* отмечались нами только на контрольном участке.

Имеется ряд видов, которые отмечались как на самом заросшем стационаре, так и на контрольном участке: *Acupalpus flavicollis*, *Agonum fuliginosum*, *A. sexpunctatum*, *Anisodactylus binitatus*, *Asaphidion flavipes*, *Badister bullatus*, *B. unipustulatus*, *Calosoma investigator*, *Carabus cancelatus*, *Harpalus latus*, *Oxypselaphus obscurus*, *Poecilus cupreus*, *Pterostichus melanarius*, *Pt. oblongopunctatus*, *Synuchus vivalis*. Примечателен тот факт, что на контрольном участке особей этих видов в основном было больше либо отмечались единично, как и на стационаре «Отвал 3». Есть основание полагать, что такое количество видов, отмеченных нами на этих двух изучаемых территориях, связано с тем, что сукцессионные процессы на самом старом и заросшем отвале привели к схожести с контрольным участком в начале нашего исследования.

Следует также добавить, что такие виды как *Amara communis*, *Bembidion lampros*, *Calathus melanocephalus*, *C. micropterus*, *Carabus granulatus*, *C. hortensis*, *Curtonotus aulicus*, *Leistus rufescens*, *Microlestes minutulus*, *Poecilus lepidus*, *P. versicolor*, *Pterostichus nigrata* и *Pt. strenuous* были нами отмечены на стационарах со средней степенью зарастания растительностью и с высокой, а также на контрольном участке.

В свою очередь для сравнения видового состава сообществ жуужелиц на стационарах с разной степенью зарастания растениями мы использовали коэффициент Жаккара (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициент видовой общности сообществ жуужелиц

Стационар	Отвал 1	Отвал 2	Отвал 3	Контроль
Отвал 1		0,27	0,16	0,13
Отвал 2	0,27		0,41	0,31
Отвал 3	0,16	0,41		0,55
Контроль	0,13	0,31	0,55	

По полученным результатам можно сказать, что наиболее высокую общность сообществ имеют стационар «Отвал 3» и контрольный участок, коэффициент Жаккара которых составил 0,55. В свою очередь коэффициент сходства видового состава жесткокрылых на стационарах «Отвал 2» и «Отвал 3» составил 0,41, что говорит об достаточно высоком сходстве. При этом низкое сходство жуков имеет стационар «Отвал 2» и контрольный участок (0,31) и стационар «Отвал 1» (0,27). В тоже время в ходе анализа было доказано, что сходства видового состава не наблюдалось между наименее заросшим стационаром и наиболее заросшим (0,16), а также между контрольным участком (0,13).

Заключение. Подводя итоги, можно сказать, что представители таких родов как *Amara* (*Amara aenea*), *Broscus* (*Broscus cephalotes*), *Calathus* (*Calathus erratus*, *C. fuscipes*), *Harpalus* (*Harpalus rubripes*, *H. rufipes*, *H. tardus*) и *Pterostichus* (*Pterostichus niger*) были отмечены на трех отвалах производства удобрений, а также на контрольном участке. Таким образом, можно сказать, что изучаемое семейство характеризуется широкой экологической пластичностью. В довершение высокое сходство видового состава сообществ было отмечено между самым заросшим стационаром и контрольным участком, а также между стационарами «Отвал 2» и «Отвал 3».

В результате исследований можно констатировать изменения, которые происходят в ассамблеях жуужелиц по мере сукцессионных процессов на отвалах фосфогипса, связанные как с изменением видового спектра жуужелиц, так и численности.

Литература

1. Романкина, М. Ю. Биоиндикационное значение жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) березовых лесополос Тамбовской области / М. Ю. Романкина, Т. В. Шаламова // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18, вып. 6. – С. 3216–3219.
2. Гиляров, М. С. Зоологический метод диагностики почв / М. С. Гиляров. – М., 1965. – 278 с.
3. Aleksandrowicz, O. The check-list of Belarus Coleoptera / O. Aleksandrowicz, A. Pisanenko, S. Ryndevich, S. Saluk. – Slupsk : Akademia Pomorska w Slupsku, 2023. – 189 p.

Возобновление дуба в производных березовых насаждениях южной части Беларуси

М.С. ЛАЗАРЕВА, И.А. БУЛАВКИНА, Л.К. КЛИМОВИЧ

В статье приведены особенности развития подроста под пологом березовых древостоев в лесорастительных условиях C_{2-3} – D_{2-3} южной части Беларуси. Выявлены перспективные насаждения для перевода производных березовых насаждений в хозяйственно ценные твердолиственные путем проведения лесохозяйственных мероприятий.

Ключевые слова: естественное возобновление, березовые насаждения, дубрава, тип леса, тип лесорастительных условий, подрост, качество подроста, лесохозяйственные мероприятия.

The article presents the features of undergrowth development under the canopy of birch stands in the C_{2-3} – D_{2-3} forest conditions of the southern part of Belarus. Promising plantings have been identified for the conversion of birch derivatives into economically valuable hardwoods through forestry measures.

Keywords: natural renewal, birch plantations, oak grove, type of forest, type of forest conditions, undergrowth, undergrowth quality, forestry measures.

Введение. В настоящее время дубравы Беларуси занимают более 271 тыс. га [1]. Распространены они на всей территории республики, однако более 40 % дубрав произрастают в Полесско-Приднестровском геоботаническом округе подзоны широколиственно-сосновых лесов.

Одним из направлений ведения научно обоснованного лесного хозяйства является оптимизация лесопокрытой площади, и, прежде всего, сохранение и восстановление коренных насаждений, в том числе дубовых, предотвращение нежелательной смены пород в них и предпочтение естественному возобновлению дуба в соответствующих для его роста лесорастительных условиях [2].

Еще в 19 в. С.И. Коржинский писал: «...дуб возобновляется путем естественного обсеменения крайне трудно – есть факт общеизвестный». Раскрывая причинность этого явления, автор подчеркивал: «...дуб крайне светлюбивая порода, которая совершенно не может развиваться в затенении, и даже ростки его исчезают под пологом древесных пород уже через 2...3 года». Превращение дубового самосева под пологом леса в торчки также свидетельствует о том, что с самого раннего возраста дуб нуждается в достаточно большом количестве света [3]–[4]. Одной из основных трудностей при формировании и выращивании дубовых насаждений является требовательность дуба в верхнем освещении с одновременным боковым отенением нижней части кроны, что обуславливает интенсивный рост дуба в высоту с формированием при этом ровного ствола.

Резервом для восстановления коренных дубрав являются производные березовые древостои в свежих и влажных дубравах и сложных субориях с наличием в составах дуба и других твердолиственных видов.

Целью данной работы являлось исследование естественного возобновления леса в производных от дуба березовых насаждениях южной части Беларуси.

Объекты и методы исследования. Объекты исследований – молодняки 2 класса возраста и средневозрастные березовые насаждения, произрастающие в типах лесорастительных условий C_{2-3} – D_{2-3} в южной части Беларуси (на примере Милошевичского лесхоза).

В лесном фонде Милошевичского, Глушковичского, Дзержинского и Слободского лесничеств Милошевичского лесхоза отобраны выдела березовых насаждений, которые можно рассматривать как резерв увеличения дубовой формации. При рациональном лесопользовании, а при необходимости и частичных лесовосстановительных мероприятиях, эти насаждения могут являться объектом для перевода в ценное хозяйство, что значительно повысит их хозяйственную значимость [5].

Материалы статьи являются результатом исследований, которые использовались в том числе и при написании магистерской диссертации одного из соавторов.

Выполнен сбор лесостроительной информации, выбрано 34 выдела площадью около 119 га, проведено обследование насаждений в натуре с подбором участков для закладки пробных площадей в березняках 30–70-летнего возраста. На 12 пробных площадях (ПП) произведены сплошной пересчет деревьев и замеры высот, на учетных площадках – учет подроста. В камеральных условиях определены все таксационные показатели насаждения и установлены количественные и качественные характеристики подроста. Проведена систематизация материалов, математико-статистическая обработка полученных результатов исследований и их анализ с учетом [6]–[10].

Результаты и их обсуждение. В исследования включены березовые насаждения, в которых дуб таксировался как в составе древостоя, так и в подросте, общей площадью 118,9 га. На рисунке 1 представлено березовое насаждение с наличием подроста дуба.



Рисунок 1 – Березняк орляковый

Изучаемые насаждения имеют смешанный состав, представленный в основном мягколистными видами (береза, осина, ольха черная) с небольшим участием твердолиственных (дуб, липа, граб) и хвойных (сосна) видов.

В подлесочном ярусе на всех пробных площадях встречались лещина и крушина ломкая, на отдельных – рябина, бересклет бородавчатый, ивы. В напочвенном покрове наряду с видами-эдикаторами в разных соотношениях присутствовали майник двулистный, грушанка круглолистная, ветреница дубравная, ясменник душистый, седмичник европейский, на отдельных ПП – копытень европейский, пятнами встречались зеленые мхи (Шребера, дикранум).

Полнота насаждений изменялась от 0,5 до 0,9, в основном составляя 0,7.

Возраст насаждений варьировал от 30 до 70 лет, однако более 80 % площади березняков с имеющимся подростом дуба относятся к древостоям III класса возраста (рисунок 2).

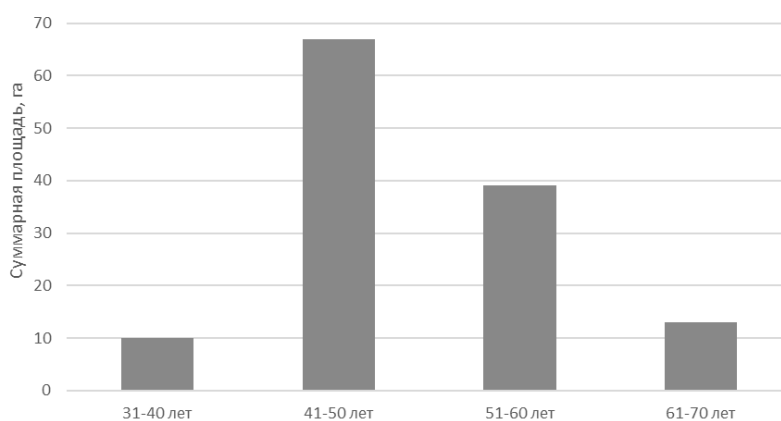


Рисунок 2 – Распределение площадей березовых насаждений с наличием в составах подроста дуба по возрастным группам

Пробные площади представлены смешанными березовыми насаждениями кисличных, черничных, орляковых и снытевых типов леса. Во всех насаждениях береза преобладала, составляя от 4 до 8 единиц состава и на всех ПП присутствовал в составах дуб, не превышая 20 % запаса древостоя.

В большей части насаждений встречаются осина и ольха черная. В березняках черничных и частично кисличных растет сосна. В отдельных насаждениях отмечается примесь граба и липы. Характеристика пробных площадей представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика насаждений и подроста на пробных площадях

№	Состав насаждения	Возраст, лет	ТЛ ТЛУ	Состав подроста	Коэффициент встречаемости	Количество, шт.		Коэффициент качества
						всего	дуба, условно крупного	
1	6Б3Ос1Д	40	<u>Б. сн</u> Д ₃	3Д4Б3Ос	0,33	8 572	1619	0,19
2	7Б2Ос1Д	45	<u>Б. ор</u> С ₂	4Д5Ос1Б	0,29	4 706	1352	0,3
3	5Б2С2Олч1Д	65	<u>Б. кис</u> Д ₂	3Д5Б2Олч1С	0,18	5 293	770	0,14
4	6Б2Д1С1Олч+Г	65	<u>Б. кис</u> Д ₂	4Б3Г2Д1С	0,29	8 234	764	0,09
5	7Б2Д1Ос+Лп	50	<u>Б. кис</u> Д ₂	3Д5Б2Ос	0,18	4 705	941	0,2
6	8Б1Олч1Ос+Д+Г	55	<u>Б. кис</u> Д ₂	7Б3Д	0,18	3 529	588	0,17
7	6Б1Д1С1Ос1Олч	50	<u>Б. кис</u> Д ₂	6Б3Д1Ос	0,24	5 293	882	0,17
8	6Б2Ос2Олч+Д	55	<u>Б. чер</u> С ₃	5Б3Ос2Д	0,18	4 117	588	0,14
9	5Б2Ос1Д1С1Олч	45	<u>Б. чер</u> С ₃	3Д4Б3Ос	0,53	9 411	1941	0,17
10	6Б1Д1С1Олч1Ос	70	<u>Б. чер</u> С ₃	5Б2Д2Ос1Олч	0,29	7 646	882	0,115
11	4Б2С2Ос1Д1Олч	45	<u>Б. чер</u> С ₃	4Ос3Б2С1Д	0,53	11 765	882	0,075
12	6Б1Ос1С1Олч1Д	65	<u>Б. чер</u> С ₃	5Б3Ос2Д	0,47	9 412	1823	0,19

Изучаемые производные березовые насаждения характеризуются большой вариабельностью вариантов смешения древесных видов, что вызывает необходимость индивидуального подхода к каждому насаждению с учетом их отличий по типу лесорастительных условий, возрасту, полноте, распределению деревьев по площади и др. Такое разнообразие обуславливает и различия в ходе естественного возобновления.

В результате исследований установлено, что под материнским пологом производных от дуба березовых насаждений в целом процесс естественного возобновления леса протекает удовлетворительно. Кроме того, в составе подроста в разном количественном соотношении встречаются и хозяйственно ценные породы – дуб, на некоторых участках – сосна, единично – липа.

Следует отметить, что все насаждения обеспечены естественным возобновлением, поскольку общее количество подроста на ПП составляет от 3,53 до 11,77 тыс. шт./га. В составе подроста представлены береза, осина, граб, ольха черная, дуб и сосна.

Практически на всех ПП в составе подроста преобладает береза, и только на двух (ПП2, ПП11) – осина.

Наибольшее количество подроста имеется в березняках черничных (ПП11 – 11,8 тыс. шт./га, ПП9 и ПП12 – по 9,4 тыс. шт./га). Из березняков кисличных наибольшее количество подроста имеется на ПП4 (8,2 тыс. шт./га). В березняке снытевом общее количество подроста составило 8,6 тыс. шт./га, в березняке орляковом – 4,7 тыс. шт./га.

Учитывая богатые лесорастительные условия, в которых произрастают исследуемые березняки, хозяйственно ценной (целевой) породой является дуб, а также сосна, если она не мешает росту главной породы.

На всех пробных площадях подрост дуба располагался неравномерно по площади и, в основном, приурочен к «окнам» в лесном пологе, о чем свидетельствует коэффициент встречаемости подроста на пробных площадях. Дубовый подрост, расположенный в хорошо освещенных местах – «окнах», показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Подрост дуба под пологом березового насаждения

Подрост дуба черешчатого встречался на всех пробных площадях и его общее количество варьировало от 1,2 тыс. шт./га (ПП8, ПП11) до 2,4 тыс. шт./га (ПП9, ПП12). В насаждениях в различных количественных соотношениях встречался мелкий, средний и крупный подрост дуба.

Основным критерием для оценки успешности естественного возобновления под пологом леса является наличие крупных (либо условно крупных) экземпляров подроста.

Наибольшее количество подроста, в переводе на условно крупный, имеется на ПП1,2,9 и 12. На данных пробных площадях имеется подрост разной крупности, что свидетельствует об относительно благоприятных условиях для естественного возобновления дуба.

Общее количество подроста дуба в березняках кисличного типа леса отличалось незначительно, в среднем, составляя – 1,2 тыс. шт./га. Разное соотношение мелкого, среднего и крупного в этих древостоях обусловило отличия в количестве при переводе в условно крупный подрост (таблица 1).

В березняках черничных общее количество дубового подроста варьировало в пределах 825 – 2825 шт. на 1 га при разном соотношении мелкого, среднего и крупного подроста. На рисунке 4 приводится количество подроста дуба в березняках черничных в переводе на условно крупный.

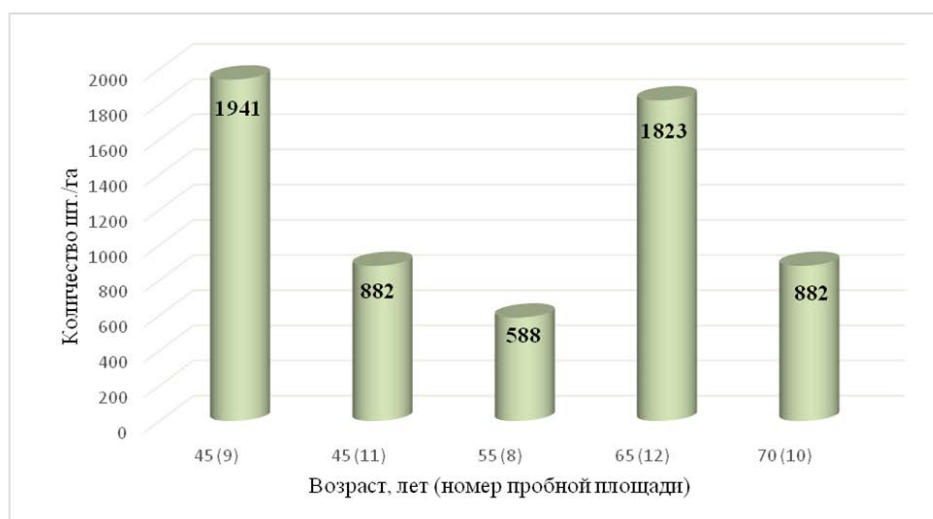


Рисунок 4 – Количество условно крупного подроста дуба в березняках черничных

В соответствии с коэффициентом качества (благонадежности), лишь на одном участке (ПП2) подрост характеризуется как удовлетворительный. Это означает, что в 45-летнем березняке орляковом при вырубке подроста осины вероятность формирования в будущем хозяйственно ценного дубового насаждения естественным путем высока.

Однако при правильном проведении лесохозяйственных мероприятий, в виде регулярных и своевременных изреживаний материнского полога с одновременными рубками в подросте с удалением экземпляров нецелевых пород в 45-ти и 65-летнем березняках черничных (ПП9 и 12) с количеством 1,9–1,8 тыс. шт./га условно крупного подроста дуба, а также в 40-летнем березняке снытевом (ПП1) с количеством подроста дуба 1,6 тыс. шт./га возможно восстановление в последующем коренных, высокопродуктивных дубовых насаждений без проведения лесокультурных работ.

Как показали исследования, имеются насаждения (40–45-летние березняки), в которых количество подроста дуба составляет менее 1,0 тыс. шт./га, но при наличии источников обсеменения и мерах содействия естественному возобновлению возможно обеспечить появление и укоренение всходов и создать условия для их дальнейшего роста. Такие древостои можно также отнести к перспективным с точки зрения восстановления коренных дубрав.

В перспективных насаждениях считаем целесообразным назначать в средневозрастных, приспевающих и спелых группах возраста рубки переформирования, при которых уход ведется за всеми поколениями леса с применением равномерного, группового, куртинного способов ухода. Кроме того, при рубках переформирования возможно создание подпологовых лесных культур, а в данных насаждениях, учитывая групповое расположение подроста дуба, создание частичных лесных культур (площадками).

Таким образом, в производных от дуба березовых насаждениях южной части Беларуси идет активный процесс естественного возобновления леса. В составах подроста в разных соотношениях преобладают мелколиственные породы. Встречается также и дуб, молодое поколение которого адаптировано к условиям местопроизрастания и характеризуется генетическим разнообразием, свойственным коренным дубравам. Наибольшая частота встречаемости подроста дуба в производных березняках установлена в насаждениях возрастного диапазона 41–60 лет.

При наличии в составах материнских древостоев дуба и его спутников вероятность появления молодого поколения этих пород очень высока. Однако сохранность подроста дуба, обеспечение его преобладания в составе, регулирование густоты возможны лишь с участием человека.

Проведение рубок переформирования с целью перевода производных березовых насаждений в хозяйственно ценные дубовые целесообразно при наличии благонадежного подроста дуба в 60–65-летних древостоях в количестве не менее 1,5 тыс. шт./га, в 50–55-летних – не менее 1,0 тыс. шт./га и при наличии источников обсеменения в составе материнского полога.

Литература

1. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь : по сост. на 1.01.2024 г. / М-во лесного хозяйства Респ. Беларусь ; Лесоустроительное республиканское унитарное предприятие «Белгослес». – Минск, 2025. – 87 с.
2. 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.
3. Лесоводство с основами ботаники и дендрологии : учеб. пособ. / М. С. Лазарева [и др.]. – Минск : РИПО, 2016. – 226 с.
4. Потапенко, А. М. Восстановление плакорных смешанных дубрав с использованием естественного возобновления дуба черешчатого в условиях юго-востока Беларуси : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.03.02 / А. М. Потапенко ; Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2015. – 22 с.
5. Лазарева, М. С. Особенности распространения и типологическая структура дубовых насаждений Беларуси в разрезе лесорастительных районов / М. С. Лазарева, Т. Л. Барсукова // Труды БГТУ. Сер. I : Лесное хозяйство. – Минск : БГТУ, 2009. – Вып. XVIII. – С. 130–133.
6. 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 Республики Беларусь, 2018. – 96 с.
7. Сукачев, В. Н. Программа и методика биоценологических исследований / В. Н. Сукачев, Н. В. Дылис. – М. : Наука, 1966. – 118 с.
8. Методы изучения лесных сообществ / Е. Н. Андреева [и др.]. – СПб. : НИИХимии СПбГУ, 2002. – 240 с.
9. Уткин, А. И. Изучение лесных биогеоценозов / А. И. Уткин // Программа и методика биогеоценологических исследований. – М. : Наука, 1974. – С. 281–317.
10. Багинский, В. Ф. Лекции по системному анализу для лесоводов / В. Ф. Багинский. – Брянск : БГИТА, 1997. – 157 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 19.03.2025

Изоляция как фактор изменчивости морфометрических признаков и биомассы жужелицы садовой (*Carabus hortensis* Linnaeus, 1758)

Г.Г. Сушко, А.В. Стальмах, А.С. Ткачёнок, И.А. Литвенкова, А.А. Лакотко

В статье представлены результаты исследований влияния изоляции на морфометрические показатели и биомассу (MIB) имаго жужелицы *Carabus hortensis* Linnaeus, 1758. Выявлена общая тенденция к снижению размеров головы, переднеспинки и длины бедра первой конечности с одной стороны и к увеличению общей длины тела – с другой. Ординация РСА показала, что длина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий, длина бедра и длина тела вносят наибольший вклад в дифференциацию морфометрических признаков *C. hortensis* в изолированных биотопах. На основании дисперсионного анализа (two-way ANOVA) продемонстрировано, что тип биотопа значимо ($p < 0,05$) влияет на изменчивость таких признаков, как длина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина бедра. С другой стороны, дифференциация таких признаков, как ширина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина тела, а также MIB связаны с половым диморфизмом.

Ключевые слова: изоляция, метапопуляции, *Carabus hortensis*, морфометрические признаки, Белорусское Поозерье.

The article presents the results of the study of the isolation effect on the morphometric parameters and biomass (MIB) of the ground beetle imago *Carabus hortensis* Linnaeus, 1758. A general tendency towards a decrease in the size of the head, pronotum and length of the first limb femur on one hand and an increase in the total body length on the other hand was revealed. PCA ordination showed that the head length, pronotum width, elytra length, femur length and body length make the greatest contribution to the differentiation of morphometric features of *C. hortensis* in isolated habitats. Based on the analysis of variance (two-way ANOVA), it was demonstrated that the habitat type significantly ($p < 0,05$) affects the variability of such morphometric parameters as the head length, pronotum width, elytra length and femur length. On the other hand, differentiation of such features as the head width, pronotum width, elytra length and body length, as well as MIB are associated with sexual dimorphism.

Keywords: isolation, metapopulations, *Carabus hortensis*, morphometric features, Belarusian Poozerie.

Введение. Размеры тела в целом и отдельные морфометрические показатели являются интегральными признаками, которые влияют на множество физиологических, адаптационных и онтогенетических процессов. Морфологическая изменчивость на уровне популяций может быть использована для индикации экологического состояния экосистем. Кроме того микроэволюционные процессы могут проявляться в морфологической дифференциации популяций. Насекомые, как правило, не эволюционируют в сторону больших размеров, так как крупные особи характеризуются значительными энергозатратами [1], [2]. Напротив, в условиях ограниченных ресурсов или неблагоприятных факторов окружающей среды снижение размеров тела может быть выгодным, позволяя насекомым стать более выносливыми к голоду и ухудшению условий обитания [2]–[4].

Размеры тела различных видов и их вариабельность используются и для оценки влияния изоляции в исследованиях в области островной биогеографии. Согласно правилу Фостера (правило острова), некоторые виды, обитающие на островах, эволюционировали с большим размером тела (островной гигантизм), в то время как другие стали меньше (островная карликовость). Предполагается, что представители одного вида увеличиваются в размерах на островах из-за снижения давления хищников или отсутствия некоторых из них, по сравнению с материком. Представители других видов уменьшаются в размерах, когда пищевые ресурсы ограничены из-за уменьшения размеров местообитания по площади на острове [5].

Охарактеризованные особенности вариации морфологии организмов вследствие изоляции на островах выявлены в основном на примере позвоночных животных. Подобные исследования с использованием беспозвоночных и в частности насекомых крайне ограничены. Для оценки влияния изоляции на изменчивость морфологии среди последних особый инте-

рес представляют жуки семейства жужелиц. Многие виды данного семейства широко распространены в мире, а их биология и экология хорошо известны. Кроме того, они являются признанными биоиндикаторами и чутко реагируют на изменения окружающей среды [6].

Верховые болота считаются островными экосистемами вследствие высокой специфичности экологических условий местообитаний и высокой специализации фауны. В свою очередь на верховых болотах на повышениях рельефа сохранились небольшие участки минеральных почв, покрытые лесной растительностью (так называемые минеральные острова). Следовательно, экологические условия таких сильно изолированных экосистем могут обусловить изменчивость размеров жужелиц в метапопуляциях островов по сравнению с крупными неизолрованными популяциями. В связи с этим цель представленной работы – изучить влияние изоляции на морфометрические показатели и биомассу жужелицы *Carabus hortensis* Linnaeus, 1758 в условиях минеральных островов на верховом болоте.

Материалы и методы исследования. *Carabus hortensis hortensis* Linnaeus, 1758 – лесной мезофильный вид жужелиц, приуроченный к лесам различных типов. Вид в основном активен ночью. Среди представителей семейства жужелицы – это крупный и активный многоядный хищник. Жуки не способны летать [7]. На территории Беларуси *C. hortensis* распространен повсеместно, относится к массовым лесным видам. Период активности имаго – июнь–октябрь [8].

Исследования проводились в сосновых лесах, расположенных на 2 минеральных островах на верховом болоте «Болото Мох» в Миорском районе Витебской области, которые изолированы болотным массивом от окружающих биоценозов. В качестве контроля были выбраны широко распространенные на территории Белорусского Поозерья сосняки черничные, расположенные в окрестностях данного верхового болота на расстоянии около 3 км. Протяженность островов в длину составляла 200 и 260 м соответственно. Расстояние от островов до края болота было не менее 300 м.

Материал собран с помощью почвенных ловушек. Сборы проводились с апреля по ноябрь 2023 г. Для измерений было в случайном порядке выбрано по 30 самцов и 30 самок в 2 изолированных сосновых лесах на минеральных островах и в 2 контрольных «материковых» сосняках. Всего измерено 120 имаго *C. hortensis*. У каждого образца измерены ширина головы, длина головы, ширина переднеспинки, длина переднеспинки, длина надкрылий слева, длина бедра передней левой конечности и длина тела. Все параметры измерялись с помощью электронного штангенциркуля (точность до 0,001 мм). Чтобы свести к минимуму возможные ошибки измерения, каждый показатель измерен три раза, рассчитано среднее арифметическое трех измерений, которое впоследствии использовалось для анализа. Для сравнения длинны надкрылий и длинны бедра первой конечности использовали измерение с левой стороны каждой особи, чтобы избежать потенциальных проблем, возникающих из-за флуктуирующей асимметрии в различных популяциях.

Морфометрические данные перед анализом были нормализованы путем логарифмического преобразования. Так как переменные могут коррелировать друг с другом, сначала был выполнен корреляционный анализ (корреляция Пирсона). Длина переднеспинки – как метрика с высоким коэффициентом корреляции ($r \geq 0,7$) – была исключена из анализа. Для выявления ошибок измерения и выбросов использовали диаграммы рассеяния и тест Граббса (tG). Для сравнения морфометрических показателей использовали t-критерий Стьюдента. Вариабельность признаков оценивалась с помощью коэффициента вариации (CV, %). Оценка различий всех измеренных морфометрических признаков в изолированных и неизолрованных местообитаниях была выполнена на всем наборе данных с помощью анализа главных компонент (PCA) на основе ковариационной матрицы. Двухфакторный дисперсионный анализ (two-way ANOVA) был проведен для определения влияния типа местообитания (биотоп) и половой дифференциации (пол) на изменчивость измеренных морфологических признаков и биомассы. Значимость two-way ANOVA была рассчитана с использованием теста Монте-Карло с 999 перестановками. Биомасса (Mean Individual Biomass, MIB) рассчитана по формуле, которая описывает связь между длиной тела (x) и массой живых имаго жужелиц: $\ln y = -8,928 + 2,555 \times \ln x$ [9]. Все анализы выполнены для самцов и самок по отдельности, а также для общего массива данных без деления по половой принадлежности. Для расчетов использовали приложение Past 4.16 [10].

Результаты исследования и их обсуждение. Большинство видов жуелиц характеризуются половым диморфизмом, который выражается в более крупных размерах имаго самок [7]. Поэтому вначале мы сравнили морфометрические показатели самцов и самок, собранных в контрольных биотопах между собой, а затем выполнили такие же сравнения для обитателей остров. Измеренные показатели имаго самок контрольных участков были значимо выше по сравнению с самцами: ширина головы ($t = 4,33$, $p = 0,0001$), длина головы ($t = 4,64$, $p = 0,0001$), ширина переднеспинки ($t = 3,87$, $p = 0,0004$), длина надкрылий ($t = 5,85$, $p = 0,001$), длина тела ($t = 5,97$, $p = 0,0001$). Такая же тенденция отмечена и для изолированных лесов, где имаго самок также были крупнее самцов: ширина головы ($t = 3,80$, $p = 0,0008$), длина головы ($t = 7,35$, $p = 0,0001$), ширина переднеспинки ($t = 4,01$, $p = 0,0001$), длина надкрылий ($t = 9,26$, $p = 0,0001$), длина тела ($t = 7,99$, $p = 0,0001$).

Далее мы выполнили сравнение морфометрических показателей *C. hortensis* между особями, обитающими в лесах минеральных островов и в контрольных биотопах. Среди 6 морфометрических признаков 4 имели значимые различия. Длина головы, ширина переднеспинки и длина бедра были значимо ($p < 0,05$) выше в контроле и только длина надкрылий была значимо выше в лесах на островах. Наибольшей вариабельностью отличались ширина ($CV = 9,11\%$) и длина головы ($CV = 14,75\%$). В изолированных популяциях наряду с шириной ($CV = 7,52\%$) и длиной головы ($CV = 17,49\%$) высокой вариабельностью отличалась и длина бедра ($CV = 7,26\%$), тогда как в контрольных биотопах значения данного показателя варьировали менее всего. Вариабельность остальных признаков в обоих типах местообитаний была сходной (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерения морфологических признаков имаго *Carabus hortensis* (объединенные данные для двух полов)

Морфометрический показатель	Контроль			Изолированные леса			t	p
	M (мм)	SD	CV (%)	M (мм)	SD	CV (%)		
ширина головы	2,625	0,239	9,108	2,576	0,194	7,524	1,599	0,111
длина головы	4,701	0,694	14,756	4,013	0,702	17,496	7,230	0,0001
ширина переднеспинки	6,513	0,376	5,766	6,408	0,366	5,715	2,145	0,033
длина надкрылья	15,291	0,898	5,874	15,512	0,812	5,236	2,041	0,042
длина бедра	6,083	0,304	5,005	5,700	0,414	7,266	8,186	0,0001
длина тела	23,930	1,262	5,272	24,127	1,061	4,397	1,372	0,172

Примечание: M – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации, t – критерий Стьюдента, p – уровень значимости.

Выявлены различия морфометрических признаков по половому признаку. Среди самок большинство измеренных показателей, кроме длины надкрылий, при изоляции в целом снижается. Однако значимые различия выявлены только для ширины и длины головы, длины надкрылий и длины бедра ($p < 0,05$). Наибольшим значением коэффициента вариации в контроле отличались ширина и длина головы в обоих типах местообитаний, а также длина бедра в изолированных лесах. Для самцов значимых изменений размеров головы не обнаружено, ширина переднеспинки и длина бедра значимо ($p < 0,05$) ниже, тогда как длина тела значимо возрастает ($p < 0,05$). Наибольшей вариацией также характеризовались размеры головы в двух типах местообитаний и размеры бедра в изолированных лесах (таблицы 2, 3).

Таблица 2 – Результаты измерения морфологических признаков имаго самок *Carabus hortensis*

Морфометрический показатель	Контроль			Изолированные леса			t	p
	M (мм)	SD	CV (%)	M (мм)	SD	CV (%)		
ширина головы	2,743	0,224	8,176	2,654	0,142	5,338	2,594	0,0107
длина головы	5,061	0,341	6,741	3,873	0,682	17,600	12,073	0,0001
ширина переднеспинки	6,683	0,288	4,309	6,595	0,331	5,026	1,555	0,1225
длина надкрылья	15,826	0,701	4,431	16,072	0,605	3,763	2,055	0,0421
длина бедра	6,144	0,228	3,706	5,710	0,422	7,391	7,013	0,0001
длина тела	24,706	1,002	4,056	24,773	0,841	3,393	0,397	0,6922

Примечание: M – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации, t – критерий Стьюдента, p – уровень значимости.

Таблица 3 – Результаты измерения морфологических признаков имаго самцов *Carabus hortensis*

Морфометрический показатель	Контроль			Изолированные леса			t	p
	M (мм)	SD	CV (%)	M (мм)	SD	CV (%)		
ширина головы	2,507	0,192	7,648	2,498	0,208	8,327	0,260	0,795
длина головы	4,341	0,769	17,709	4,154	0,700	16,847	1,400	0,164
ширина переднеспинки	6,344	0,378	5,964	6,222	0,300	4,821	1,960	0,049
длина надкрылья	14,755	0,743	5,036	14,952	0,572	3,824	1,623	0,107
длина бедра	6,021	0,357	5,929	5,690	0,409	7,196	4,729	0,0001
длина тела	23,154	0,991	4,281	23,481	0,846	3,602	1,945	0,050

Примечание: M – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации, t – критерий Стьюдента, p – уровень значимости.

С помощью PCA были обнаружены отчетливые различия совокупности всех измеренных морфологических признаков между изолированными и контрольными местообитаниями. В случае пола также было мало совпадений между самцами и самками на основе морфологических признаков (рисунок 1).

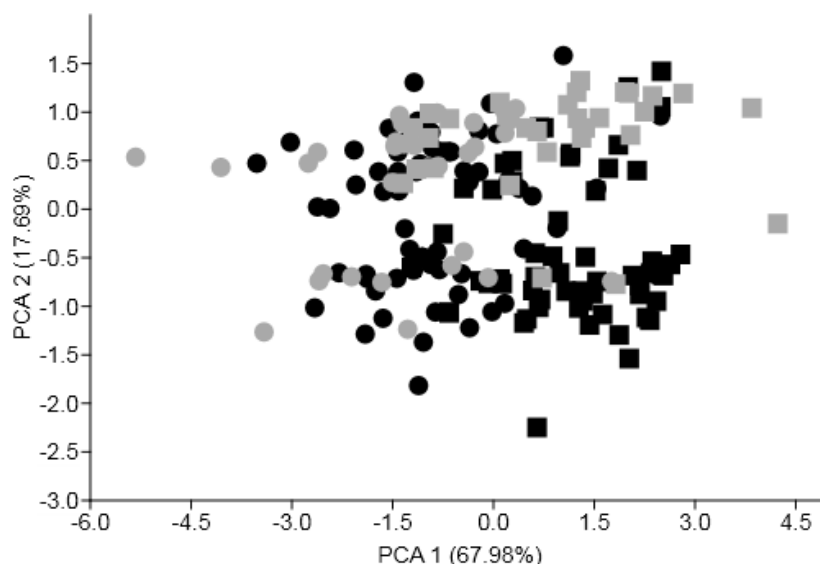


Рисунок 1 – Ординация (PCA) морфометрических признаков имаго *Carabus hortensis*. Острова обозначены черным цветом, контроль – серым, самки – квадратами, самцы – точками

Для первой главной компоненты (PC 1) (67,98 % общей вариации, собственное значение 2,58) наибольшие факторные нагрузки были зарегистрированы для комбинации таких признаков как длина тела и длина надкрылья. Вторая главная компонента (PC 2) объясняет 17,69 % общей дисперсии с собственным значением 0,67 и коррелирует в наибольшей степени с длиной головы, которая показала наиболее высокую факторную нагрузку по сравнению с другими морфометрическими признаками. Третья главная компонента (PC 3) объясняет 5,67 % общей дисперсии с собственным значением 0,21. С ней коррелируют ширина переднеспинки и длина бедра. Эти три главных компоненты объяснили около 91,34 % кумулятивной дисперсии.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа, проведенного по каждому морфометрическому признаку отдельно, показали значимые ($p < 0,05$) влияния типа биотопа на такие признаки, как длина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина бедра. Это согласуется с результатами анализа главных компонент. Тогда как вариация таких признаков, как ширина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина тела связаны с половым диморфизмом. Совместное взаимодействие типа биотопа и пола продемонстрировало только длина головы (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (two-way ANOVA) различий морфологических признаков имаго *Carabus hortensis*

Переменная отклика	Независимая переменная	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	F-критерий	p-уровень
ширина головы	биотоп	0,10	1	0,10	2,70	0,102
	пол	1,50	1	1,50	41,97	0,0001
	биотоп * пол	0,06	1	0,06	1,76	0,187
длина головы	биотоп	17,14	1	17,14	37,06	0,0001
	пол	0,04	1	0,04	0,09	0,765
	биотоп * пол	8,71	1	8,71	18,84	0,0001
ширина переднеспинки	биотоп	0,59	1	0,59	5,29	0,023
	пол	6,25	1	6,25	55,76	0,0001
	биотоп * пол	0,00	1	0,00	0,00	0,995
	пол	1,59	1	1,59	26,63	0,0001
длина надкрылья	биотоп * пол	0,09	1	0,09	1,58	0,211
	биотоп	1,96	1	1,96	4,80	0,030
	пол	54,82	1	54,82	134,70	0,0001
	биотоп * пол	0,02	1	0,02	0,06	0,808
длина бедра	биотоп	4,00	1	4,00	19,52	0,0001
	пол	0,00	1	0,00	0,02	0,884
	биотоп * пол	0,01	1	0,01	0,05	0,830
длина тела	биотоп	1,55	1	1,55	1,92	0,168
	пол	85,48	1	85,48	105,60	0,0001
	биотоп * пол	0,68	1	0,68	0,84	0,362

Оценка биомассы (MIB) имаго *C. hortensis* показала значимые различия между значением данного показателя для самцов и самок как в контроле ($t = 6,00$, $p = 0,001$), так и в изолированных биотопах ($t = 9,25$, $p = 0,001$) (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты измерения биомассы (MIB) имаго *Carabus hortensis*

Биомасса (MIB)	Контроль			Изолированные леса			t	p
	M (мг)	SD	CV (%)	M (мг)	SD	CV (%)		
все особи	445,499	59,634	13,386	454,183	50,977	11,224	1,371	0,172
самки	482,266	50,353	10,441	485,136	41,167	8,486	0,34189	0,732
самцы	408,732	43,449	10,630	423,229	39,975	9,445	1,1389	0,042

Примечание: M – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации, t – критерий Стьюдента, p – уровень значимости.

Масса самок во всех случаях была выше. При сравнении биомассы имаго *C. hortensis*, выявленных в лесах на минеральных островах и в контроле, данный показатель различался значительно ($p < 0,05$) только для самцов. При этом MIB последних в изолированных местообитаниях увеличилась. Вариация показателя биомассы у самцов в данных биотопах была также более высокой. Средние значения MIB всех особей, независимо от половой принадлежности, а также самок в целом были выше в лесах на островах, но эти различия не были значимыми ($p > 0,05$).

Двухфакторный дисперсионный анализ продемонстрировал значимое ($p < 0,05$) влияние пола на распределение биомассы имаго *C. hortensis* между изолированными и неизолированными местообитаниями, что подтверждает выявленную тенденцию увеличения MIB у самцов в лесах на островах (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (two-way ANOVA) различий биомассы (MIB) имаго *Carabus hortensis*

Переменная отклика	Независимая переменная	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	F-критерий	p-уровень
Биомасса (MIB)	биотоп	3016,3	1	3016,3	1,635	0,202
	пол	194731	1	194731	105,5	0,0001
	биотоп * пол	1351,68	1	1351,68	0,7325	0,393

Наши исследования продемонстрировали разную изменчивость морфологических признаков имаго жужелицы *C. hortensis* при изоляции метапопуляций данного вида на лесных островах среди болота. Выявлена общая тенденция к снижению размеров головы, переднеспинки и длины бедра передней конечности, с одной стороны, и к увеличению общей длины тела – с другой. Мы предполагаем, что уменьшение размеров головы, переднеспинки и длины бедра могут быть обусловлены меньшими размерами изолированных местообитаний. Как следствие, уменьшается необходимость длительных перемещений для поиска добычи. В частности снижение ширины переднеспинки может быть обусловлено уменьшением объема локализованных здесь мышц, связанных с конечностями. С этим же может быть связано и уменьшение длины бедра передней конечности. Уменьшение размеров головы, по всей видимости, может коррелировать с объемом надглоточного ганглия, который обрабатывает сенсорную информацию и координирует двигательные рефлексы [11]. С другой стороны, выявленная высокая вариация размеров головы может быть связана с индивидуальными особенностями адаптации к экологическим условиям. Общая тенденция к увеличению длины тела, вероятно, обусловлена увеличением объема тканей и запасов энергетически ценных веществ. Это может быть адаптацией к сохранению энергетических ресурсов, которые следует направить на производство яиц у самок [12]. Однако длина тела в изолированных местообитаниях была значимо выше только у самцов. Такой же тренд отмечен и для биомассы. Это, видимо, связано с меньшими энергозатратами при поиске самок из-за уменьшения радиуса репродуктивной активности вследствие небольшой площади островов.

Как показали другие исследования, половые различия в поведении играют важную роль в дифференциации морфологических признаков в различных условиях обитания в пределах ареала вида, включая *C. hortensis* [13]. Также известно, что для данного вида отношения между скоростью метаболизма и массой тела сильнее у самцов, чем у самок. Более крупные самки могут запастись больше липидов, чем более мелкие особи. Увеличение размеров и массы тела сопровождается увеличением метаболических затрат [12]. С другой стороны, меньшие по размерам, по сравнению с самками, самцы *C. hortensis* характеризуются большей локомоторной активностью [14]. Как показали наши исследования, половая принадлежность является ключевым фактором дифференциации биомассы, ширины головы, ширины переднеспинки, длины надкрылий и длины тела имаго *C. hortensis* в изолированных и неизолированных местообитаниях. В тоже время длина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина бедра были подвержены влиянию типа местообитания, что демонстрирует влияние изоляции на дифференциацию морфометрических признаков.

Заключение. Проанализировано влияние изоляции на морфометрические показатели и биомассу (МИБ) имаго жужелицы *C. hortensis*. Выявлена общая тенденция к снижению размеров головы, переднеспинки и длины бедра первой конечности, с одной стороны, и к увеличению общей длины тела – с другой. Как показал анализ главных компонент, длина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий, длина бедра и длина тела вносят наибольший вклад в дифференциацию морфометрических признаков *C. hortensis* в изолированных и контрольных биотопах. На основании двухфакторного дисперсионного анализа продемонстрировано, что тип биотопа значимо ($p < 0,05$) влияет на изменчивость таких признаков, как длина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина бедра. С другой стороны, дифференциация таких признаков, как ширина головы, ширина переднеспинки, длина надкрылий и длина тела связана с половым диморфизмом.

Литература

1. Honěk, A. Intraspecific variation in body size and fecundity in insects : a general relationship / A. Honěk // Oikos. – 1993. – № 66. – P. 483–492.
2. Blanckenhorn, W. U. The evolution of body size: what keeps organisms small? / W. U. Blanckenhorn // The Quarterly Review of Biology. – 2000. – № 75. – P. 385–407.
3. Huang, Y. Variation of body size in rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) and its associations with population biology / Y. Huang, Y. Ao, M. Jiang, M. O. Way // Journal of Insect Science. – 2018. – № 18 (1):4. – P. 1–7.

4. Baranovska, E. Small-scale spatiotemporal variability in body size of two common carabid beetles / E. Baranovska, M. Knapp // *Central European Journal of Biology*. – 2014. – № 9. – P. 476–494.
5. Whittaker, R. J. *Island biogeography : ecology, evolution, and conservation* / R. J. Whittaker. – Oxford : Oxford University Press, 2007. – 401 p.
6. Loevei, G. L. Ecology and behaviour of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) / G. L. Loevei, K. D. Sunderland // *Annual Review of Entomology*. – 1996. – № 41. – P. 231–256.
7. Lindroth, C. H. *The Carabidae (Coleoptera) of Fennoscandia and Denmark* / C. H. Lindroth. – Series : *Fauna Entomologica Scandinavica*. – Leiden : Brill, 1985. – Vol. 15 (1). – 225 p.
8. Александрович, О. Р. Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) запада лесной зоны Русской равнины : фауна, зоогеография, экология, фауногенез / О. Р. Александрович. – Saarbrücken : LAMBERT Acad. Publ., 2014. – 456 с.
9. Szyszko, J. Methods of macrofauna investigations / J. Szyszko // *The process of forest soil macrofauna formation after afforestation of farmland* / A. Szujecki, J. Szyszko, S. Mazur, S. Perlinski (eds). – Warsaw : Warsaw Agricultural University Press, 1983. – P. 10–16.
10. Hammer, Ø. PAST : paleontological statistics software package for education and data analysis / Ø. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // *Palaeontologia Electronica*. – 2001. – Vol. 4 (1). – P. 1–9.
11. Тыщенко, В. П. Физиология насекомых / В. П. Тыщенко. – М. : Высш. шк., 1986. – 129 с.
12. Yarwood, E. Sex differences in morphology across an expanding range edge in the flightless ground beetle *Carabus hortensis* / E. Yarwood, C. Drees, J. E. Niven, M. Gawel, W. Schuett // *Ecology and Evolution*. – 2021. – № 11 (15). – P. 9949–9957.
13. Yarwood, E. Sex-specific covariance between metabolic rate, behaviour and morphology in the ground beetle *Carabus hortensis* / E. Yarwood, C. Drees, J. E. Niven, W. Schuett // *PeerJ*. – 2021. – № 9. – P. 1–19.
14. Szyszko, J. A Differences in locomotory activity between male and female *Carabus hortensis* (Coleoptera: Carabidae) in a pine forest and a beech forest in relation to feeding state / J. Szyszko, S. Gryuntal, A. Schwerk // *Environmental Entomology*. – 2004. – № 33. – P. 1442–1446.

Особенности аккумуляции ^{137}Cs почвенно-растительным покровом пойменного луга р. Сож

С.Ф. ТИМОФЕЕВ, Н.И. КАРПЕНКО

На территории пойменного луга изучали распределение ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове и воде. Основное количество радионуклида сосредоточено в слое почвы 0–10 см. В течение 2019–2020 гг. среднее содержание ^{137}Cs для Осоковых и Злаков составило 168–296 Бк/кг. В последующие 2022–2023 гг. выявлена тенденция повышения удельной активности радионуклида в изучаемых группах. Удельная активность ^{137}Cs в луговой растительности зависела от повторяемости или отсутствия половодья. Превышение нормативных значений по данному параметру зафиксировано в единичных пробах. Установлено, что масса взвешенных веществ в воде варьировала в широких пределах и в отдельных случаях значительно превышала предельно допустимые уровни. Прозрачность воды по Секки составляла от 50 см до 150 см. Содержание ^{137}Cs в воде варьировало от минимальной детектируемой активности прибора до 10 Бк на литр.

Ключевые слова: речная долина, половодье, пойменный луг, почва, луговые растения, ^{137}Cs , водоем.

The distribution of ^{137}Cs in the soil-vegetation cover and water was studied in a water meadow. The main amount of radionuclide is concentrated in the soil layer 0–10 cm. During 2019–2020, the average ^{137}Cs content for sedges and cereals was 168–296 Bq/kg. In the subsequent 2022–2023, a trend towards an increase in the specific activity of the radionuclide in sedges and cereals was revealed. The specific activity of ^{137}Cs in meadow vegetation depends on the frequency or absence of floods. Exceeding the standard values for this parameter was recorded in single samples. It was established that the mass of suspended substances in water varied within wide limits. In some cases, it significantly exceeded the maximum permissible levels. The Secchi transparency of water ranged from 50 to 200 cm. The content of ^{137}Cs in water varied from the minimum detectable activity of the device to 10 Bq per liter.

Keywords: river valley, flood, floodplain meadow, soil, meadow plants, ^{137}Cs , pond.

Введение. После катастрофы на ЧАЭС в атмосферу было выброшено огромное количество радионуклидов, которые осели на территории водоемов, берегах рек и пойменных земель. Основные поллютанты на территории Республики Беларусь – это ^{137}Cs , ^{90}Sr [1]–[3]. Радионуклиды мигрируют в экосистемы и понижают качество получаемой продукции. Усугубляющим фактором является эвтрофикация водоемов [2]–[5].

Наиболее осложненная обстановка наблюдается на территории пойменных лугов и речных долин, расположенных в окрестностях близлежащих мелиорированных земель. Это связано с тем, что мелиорированные земли не только подвергаются регулярной обработке, но на них вносят удобрения и пестициды. Зачастую такие водоемы значительно эвтрофированы [6]–[8]. Существование данной проблемы сказывается не только на качестве получаемой продукции, но и на себестоимости кормов [9]–[11]. Как известно, наиболее выгодным кормом, в силу стоимости и качества, является растительная масса, продуцируемая пойменными лугами. Одним из параметров, снижающим качество этой продукции, является загрязнение радионуклидами [12]–[14].

С учетом данных обстоятельств на протяжении 2019–2023 гг. исследовали луговую экосистему, расположенную в окрестностях населенного пункта Шерстин Ветковского района Гомельской области. Населенный пункт находится в зоне с правом на отселение, где среднегодовая эффективная доза облучения населения может превысить 1 мЗв в год.

Цель работы. На основании изучения распределения ^{137}Cs на элементах речной долины оценить динамику изменения радиозэкологической ситуации в экосистеме.

Задачи: 1. Оценить распределение и перераспределение радиоцезия по профилю почвы. 2. Осуществить анализ динамики накопления радионуклида в растительном покрове пойменного луга. 3. Изучить содержание радиоизотопа в воде, водных и прибрежно-водных растениях.

Материалы и методы. Сопряженные растительные и почвенные пробы отбирали в ходе экспедиционных работ. Для этого на выделенных площадках срезали растения и раскла-

дывали по агроботаническим группам. На этих же площадках с помощью пробоотборника диаметром 83 мм по горизонтам отбирали почву.

Отборы проб воды и гидрофитов, определение параметров водоема осуществляли с использованием плавсредства в виде лодки. Маршрут движения по озеру определяли с помощью навигатора. Глубину озера по маршруту определяли лотом. Прозрачность воды осуществляли методом Секки [11]. Видовой состав растительности был определен с помощью «Определителя высших растений Беларуси» Т.А. Сауткина 1999 г. Отбор воды осуществляли с помощью батометра Петтерсона.

В камеральных условиях изучали параметры аккумуляции ^{137}Cs в образцах отобранных проб почвы, луговых растений, воды и гидрофитов с помощью гамма-спектрометрического комплекса Canberra с полупроводниковыми детекторами.

Результаты исследований и обсуждение. Проведение НИР было начато в 2011 г. На территории речной долины в окрестностях н.п. Шерстин Ветковского района был выделен ландшафтно-экологический профиль. Направление профиля 42 градуса по азимуту и длина около 2000 м. На выделенном ландшафтно-экологическом профиле было сформировано 3 почвенных разреза. Отбор проб почвы проводили по горизонтам.

Установлено, что среднее содержание радионуклида в горизонте 0–7 см составляло 1672 Бк/кг. По состоянию на 2011 г. более 90 % радиоцезия находилось в верхнем горизонте почвы. В среднем в горизонте 0–7 см содержалось $93,9 \pm 1,0$ %. Следы радионуклида были выявлены на глубине до 90 см.

Необходимо отметить, что в этот год наблюдалось обычное затопление пойменного луга, которое до 2015 г. было регулярным. Наши исследования проводились по периодам, 2019–2020 и 2022–2023 гг. Первый период характеризовался отсутствием затопления, а второй период – наличием затопления.

Результаты почвенного обследования через 8 лет показали заметные изменения в распределении радионуклида по профилю. По состоянию на 2019 г. содержание радиоцезия в горизонтах 0–5 см было в пределах от 59 до 91 %, слое 5–10 см от 5 до 38 %, слое 10–15 см от 1,5 до 3 %, и слое 15–20 см было около 0,5–1,6 %. Среднее содержание радионуклида в горизонте 0–5 см составляло $78,7 \pm 17,6$ %.

Через три года, то есть в 2022 г. содержание радиоцезия в горизонте 0–5 см было в пределах от 61 до 94 %, при среднем значении $82,1 \pm 9,5$ %.

Из приведенных результатов следует, что основное количество радиоцезия продолжает оставаться в верхнем слое почвы.

Можно отметить, что в период 2011–2019 гг. имело место существенное снижение изотопа в верхнем горизонте почвы. В период 2019–2022 гг. заметного изменения по данному параметру не выявлено. В немалой степени это может быть связано как с продолжительностью периода между отборами проб, так и с тем, что на протяжении 7 лет, то есть с 2015 по 2021 гг. затопления луга не было.

Как уже ранее отмечалось, первоначальные исследования были начаты в 2011 г. Содержание изотопа цезия в луговой растительности на территории речной долины было в пределах от 66 до 8847 Бк/кг при среднем значении около 2434 Бк/кг. Минимальное количество радионуклида было выявлено в травостое прирусловой поймы, около 652 ± 82 Бк/кг, и надпойменной террасы, около 478 ± 60 Бк/кг.

Для оценки радиоактивного загрязнения луговой растительности в 2019 г. произвели необходимые отборы и анализы проб. Результаты обработки данных приведены на рисунке 1.

В 2019 г. среднее содержание ^{137}Cs для группы Злаков и Осоковых составило 168–254 Бк/кг. Прежде всего необходимо отметить существенное снижение содержания радиоизотопа в травостое. В 2020 г. среднее содержание радионуклида в осоках и злаках составляло соответственно 268 и 296 Бк/кг. Отсюда следует, что заметных различий по сравнению с 2019 г. не выявлено.

Как было отмечено ранее, в 2022–2023 гг. был зафиксирован разлив р. Сож во время половодья. Для того, чтобы определить распределение и миграцию ^{137}Cs в элементах пойменного луга отбирали растительные образцы на 14 участках. Удельная активность радиоцезия в разнотравье составила от 95 до 2195 Бк/кг (рисунок 1). В группе Злаков и Осоковых средняя удельная активность изотопа составляла соответственно 382 и 505 Бк/кг. В условиях 2023 г. выявлено также увеличение удельной активности радионуклида в группе осоковых и злаков.

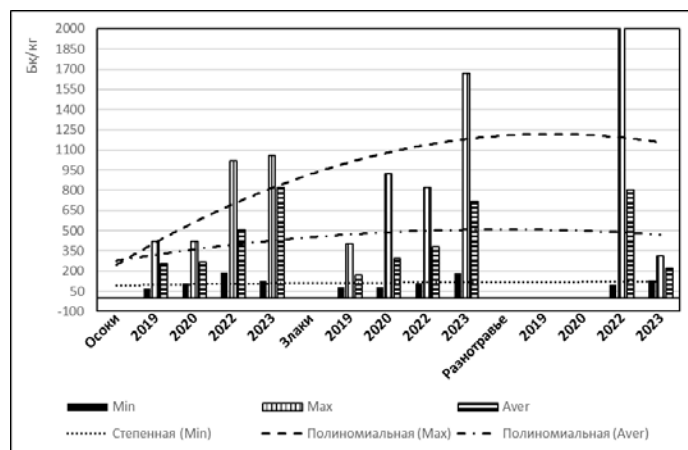


Рисунок 1 – Динамика содержания ^{137}Cs в травостое

Анализ полученной информации показал, что значительного превышения нормативов по содержанию радионуклида в период 2019–2023 гг. за исключением отдельных случаев выявлено не было.

Существенное влияние на радиоэкологическую ситуацию на изучаемом полигоне оказывает затопление пойменного луга. В своих исследованиях в силу ряда причин приходилось лишь фиксировать наличие или отсутствие затопления. Затопление пойменного луга всегда было связано с общим уровнем воды в реке Сож.

После периода отсутствия затопления пойменного луга в весенний период 2022 г. было зафиксировано половодье. По данным Белгидромета, и по нашим наблюдениям, в результате сезонных паводков в Гомельской области наблюдалось повышение уровня воды в реке Сож, в том числе и на изучаемом участке. На протяжении 2022–2023 гг. наблюдалась тенденция роста уровня воды весной во время паводков.

Существенное влияние на развитие растительного покрова оказывают многие параметры водоема, в том числе глубина и содержание взвешенных веществ.

Глубина озера Кривое связана не только со сбросами воды с мелиорированных земель, но и регулярным затоплением водой из реки Сож. Глубина водоема в 2019 г. варьировала от 50 см (в самых мелких участках водоема) до 150 см (в самых глубоких). За 3 года она уменьшилась в 3 раза и в 2021 г. не превышала 50 см, что связано с отсутствием затопления пойменного луга. Была зафиксирована флуктуации растительных сообществ, видовое разнообразие водоема уменьшилось. При возобновлении весенних паводков в 2022–2023 гг. глубина водоема возросла до 200 см, тем самым превысив показатели 2019 г.

Для общей оценки состояния водоема производили оценку распространения прибрежно-водных и водных растений (рисунок 2).

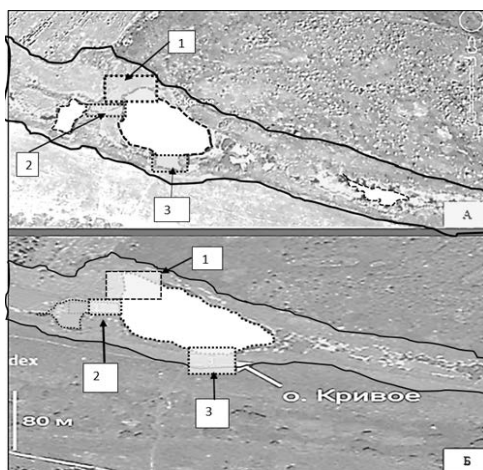


Рисунок 2 – Фрагмент озера Кривое: А – 2020 г.; Б – 2023 г.; контур 1–3 элементы озера, занятые прибрежно-водными и водными растениями

В 2020 г. на контуре 1 преобладают ситник и осока. На контуре 2 отмечается доминирование телореза обыкновенного и ряска малой. Контур 3 свободен от растительности, присутствуют в небольшом количестве лишь представители рясковых.

В 2023 г. по сравнению с 2020 г. контур 1 в основном составляет свободная от гидрофитов водная поверхность. В контуре 2 наблюдается чистое зеркало воды, гидрофиты сосредоточены лишь по нижнему краю, преобладает камыш. В контуре 3 отмечается увеличение проективного покрытие прибрежно-водной растительности и смещение линии берега в сторону озера. Доминирующими видами являются телорез и ряска. С повышением уровня воды видовое разнообразие гидроэкосистемы обогатилось.

Вернулись ранее исчезнувшие представители видов *Nuphar lutea* L., *Nymphaea alba* L. Данный факт свидетельствует о дальнейшем протекании процесса флуктуации растительных сообществ. Свободная от гидрофитов площадь зеркала озера увеличилась, мелководные растения, в особенности *Stratiotes aloides* L., занимают значительно меньшую территории акватории, что связано с разливом реки и увеличением объема воды в водохранилище. Таким образом, на протяжении всего периода исследований происходили существенные изменения целого ряда морфологических параметров водоема.

Для определения прозрачности и мутности воды отбирали пробы, двигаясь по заранее промеренной траектории. Для этого на определенных расстояниях останавливали и фиксировали лодку, воду отбирали батометром Петтерсона. Параметры прозрачности воды представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прозрачность воды по Секки, м

Год	Расстояние от берега, м					Содержание взвешенных веществ, мг/дм ³
	5	15	30	45	50	
2019	1	1	1	1,5	1	
2020	0,5	1	1	1	1	
2021	до 0,5					526
2022	1	1	1	1,5	1,5	83
2023	1	1	1	1	1,5	75

Содержание взвешенных веществ в воде значительно превышает предельно допустимые уровни (5 мг/дм³), установленные «Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 мая 2017 г. № 16» (рисунок 3).

Для оценки влияния количества взвешенных в воде веществ на прозрачность произвели соответствующие исследования. Установлена отрицательная корреляция ($K_{\phi} - 0,99988$) между прозрачностью воды и средним содержанием взвешенных веществ. Полученные данные свидетельствуют о влиянии затопления пойменного луга на изменение глубины и прозрачности озера.

Содержание ¹³⁷Cs в воде на протяжении всего исследования находилось в пределах до 10 Бк/л.

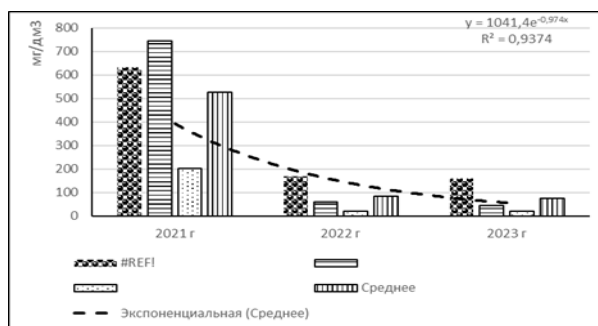


Рисунок 3 – Содержание взвешенных веществ в пробах воды

Для оценки радиоактивного загрязнения прибрежно-водных растений на протяжении 2019–2023 гг. производили отбор соответствующих проб. Прибрежно-водная и водная растительность представлены довольно ограниченным количеством видов. Это камыш озерный,

ситник лягушачий, осока острая. Водные растения представлены телорезом обыкновенным, кубышкой желтой, роголистником погруженным, ряской малой. Минимальное и максимальное содержание радионуклида составляло от 5 Бк/кг для ситника до 271 Бк/кг для роголистника. Среднее содержание радионуклида в прибрежно-водной и водной растительности составляло от 38 Бк/кг в 2020 г. до 226 Бк/кг в 2022 г.

Установлено, что с уменьшением глубины водоема увеличивается содержание ^{137}Cs в основном у мелководных растений (*Stratiotes aloides* L.). С увеличением глубины повышается содержания ^{137}Cs у гидрофитов, полностью погруженных в воду (*Ceratophyllum demersum* L.), и прибрежно-водных растений, произрастающих вблизи водоема (*Carex acuta* L., *Sambucus racemosa* L.).

Заключение. Наибольшая удельная активность ^{137}Cs характерна для верхнего слоя почвы. Установлено, что в период 2011–2019 гг. имело место существенное снижение изотопа в верхнем горизонте почвы. В период 2019–2022 гг. заметного изменения по данному параметру не выявлено.

В течение 2019–2020 гг. среднее содержание ^{137}Cs для Осоковых и Злаков составило 168–296 Бк/кг. В последующие 2022–2023 гг. выявлена тенденция повышения удельной активности радионуклида в изучаемых группах. Вероятно, это связано с влиянием затопления.

В условиях постоянного режима увлажнения, сформированного половодьем, происходит уменьшение удельной активности радиоцезия в растительности.

При отсутствии затопления существенного изменения удельной активности радионуклида в луговой растительности не происходит.

В условиях возобновления половодья после его отсутствия происходит увеличение удельной активности изотопа цезия в растительности луговых экосистем.

Таким образом, можно предположить, что существует определенная цикличность в формировании уровня радиоактивного загрязнения травостоя. Эта цикличность имеет затухающий характер и связана с режимами затопления.

Превышение нормативных значений по содержанию радионуклида в травостое выявлено лишь в единичных пробах.

Глубина водоема в период 2019–2023 гг. составляла от 50 до 200 см. Прозрачность воды по Секки изменялась с течением времени и составляла от 50 до 150 см. Масса взвешенных веществ в воде варьировала в зависимости от места взятия водных проб и значительно превышает предельно допустимые уровни. Выявлена отрицательная корреляция между прозрачностью водоема и средним содержанием взвешенных веществ. Это безусловно приводит к процессам эвтрофикации водоема.

Литература

1. Воронов, С. И. Закономерности миграции радионуклидов в природных биогеоценозах и аграрных экосистемах на территории Московской области / С. И. Воронов // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 1, № 9. – С. 154–159.
2. Парамонова, Т. А. Сравнительный анализ поступления ^{137}Cs в луговую растительность районов черноземной зоны, в различной степени загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС / Т. А. Парамонова, Е. Н. Шамшурина, В. Р. Беляев [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 429–439.
3. Журова, В. Г. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений / В. Г. Журова, М. С. Светличная // Достижения науки и образования. 2018. – № 14 (36). – С. 13–15.
4. Иванова, Н. Н. Оценка перераспределения ^{137}Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС / Н. Н. Иванова, Е. Н. Шамшурина, В. Н. Голосов [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 24–34.
5. Пучков, А. В. Особенности накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в тундровых ландшафтах Российской Арктики (на примере бассейна реки Несь, Канинская Тундра) / А. В. Пучков, Е. Ю. Яковлев // Вестник геонаук. – 2023. – № 1 (337). – С. 42–51.
6. Дайнеко, Н. М. Динамика луговых сообществ поймы р. Беседь в Ветковском районе Гомельской области (Республика Беларусь) / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев. – Брянск : РИСО БГУ, 2020. – 72 с.

7. Дайнеко, Н. М. Радиоэкологический мониторинг поймы р. Беседь Ветковского района после катастрофы на ЧАЭС / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев // Экология родного края : проблемы и пути их решения : XVI Всероссийская науч.-практ. конф., Киров, 27–28 апреля 2021 г. / ФГБОУ ВО ВятГУ ; редкол.: В. Н. Пугач [и др.]. – Киров : ВятГУ, 2021. – 445 с.
8. Бураева, Е. А. Радионуклиды в наземных экосистемах природно-техногенной территории Новочеркассковской ГРЭС / Е. А. Бураева, В. В. Чечеватова, А. И. Саевский [и др.] // Экология промышленного производства. – 2020. – № 3 (111). – С. 45–49.
9. Романова, М. Л. Тенденции изменений естественных лугов Припятского Полесья / Л. М. Романова, Г. В. Ермоленкова // Маніторинг і ацэнка стану расліннага свету : матэр. V Міжнар. канф., Мінск–Белавежская пушча, 8–12 кастрычніка 2018 г. – Мінск : Колорград, 2018. – С. 155–157.
10. Дайнеко, Н. М. Содержание цезия-137 в прибрежно-водной растительности Ветковского и Чечерского районов Гомельской области Республики Беларусь / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 15–19.
11. Андреев, Ю. А. Методика измерений температуры, прозрачности и определение запаха воды / Ю. А. Андреев, А. А. Назарова, И. А. Рязанцева // Минприроды России. – Ростов-на-Дону, 2018. – 10 с.
12. Тимофеева, Т. А. Применение ГИС-технологий для прогнозирования радиоактивного загрязнения травостоя пойменных экосистем / Т. А. Тимофеева // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2013. – № 5 (80). – С. 150–158.
13. Тимофеева, Т. А. Латеральные геохимические барьеры трансупераквальных ландшафтов (на примере поймы р. Сож) / Т. А. Тимофеева // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2017. – № 3 (102). – С. 66–71.
14. Timofeeva, T. A. Geochemical barriers of the Sozh river floodplain / T. A. Timofeeva, Gong Jia Liang // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : сб. матер. VII Международной науч.-практ. конф., Гомель, 6–7 июня 2024 г. / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: О. В. Ковалёва (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2024. – С. 295–297.

Разработка биологически активных композиций с антиоксидантными и фотозащитными свойствами на основе экстрактов из лесных лишайников

О.М. ХРАМЧЕНКОВА

Из экстрактов лишайников и касторового масла созданы биологически активные композиции с высоким уровнем фотозащиты в области УФ-Б; средней и ниже среднего эффективностью в области УФ-А, а также довольно слабой общей антиоксидантной и антирадикальной активностью. Фотозащитные свойства оценивали по величинам SPF, $\lambda_{\text{крит}}$ и соотношения УФ-А/УФ-Б; общие антиоксидантные свойства определяли методами PFRAP, CUPRAC и фосфомолибденовым; антирадикальную активность – ингибированием радикала ДФПГ, перекисного окисления линолевой кислоты, обесцвечивания β -каротина.

Ключевые слова: экстракты из лишайников, касторовое масло, параметры фотозащиты, общая антиоксидантная активность, антирадикальные свойства.

Biologically active compositions with a high level of photoprotection in the UV-B region; average and below average efficiency in the UVA region, as well as rather weak general antioxidant and antiradical activity were created from lichen extracts and castor oil. Photoprotective properties were assessed by the values of SPF, λ_{crit} , and the UVA/UV-B ratio; general antioxidant properties – by the PFRAP, CUPRAC and phosphomolybdenum assay; antiradical activity – by DPPH assay, toward lipid peroxidation by the thiocyanate method, and β -carotene bleaching assay.

Keywords: lichen extracts, castor oil, photoprotection parameters, general antioxidant activity, antiradical properties.

Введение. В настоящее время все больше людей имеет дело с последствиями загара, возникающими в результате чрезмерного воздействия солнечного света. Поэтому растет спрос на солнцезащитные средства, к которым потребителями предъявляются следующие требования: успешная защита от ультрафиолета (УФ), наличие антиоксидантных свойств, стабильность и косметическая приемлемость, «натуральность» большей части компонентов. В связи с этим различные экстракты и определенные вещества, извлеченные из водорослей, грибов, высших растений, беспозвоночных животных, все чаще используются для защиты от солнца, что представляет собой особую современную тенденцию в косметической промышленности.

С биохимической точки зрения, упомянутые соединения чаще всего представляют собой вторичные метаболиты, биосинтез которых является специфической реакцией продуцирующих организмов на определенные факторы окружающей среды. Организмы, для которых описаны фотоадаптивные механизмы (в том числе – биосинтез поглотителей ультрафиолета и антиоксидантов), далеко не всегда обитают в условиях чрезмерной инсоляции. Все они продуцируют соединения с π -электронными системами, возникающими в структурах с сопряженными связями, как алифатических, так и ароматических, циклических и гетероциклических. Такие структуры способны экранировать УФ-излучение, и, тем самым, предотвращать его проникновение в кожу, что приводит к уменьшению окислительного стресса и повреждений ДНК. У «природных» соединений была также обнаружена способность уменьшать воспаление кожи, влиять на многие другие пути ее защиты от ультрафиолета [1].

Вторичные метаболиты лишайников давно известны как соединения с множеством видов биологической активности. В 2002 г. опубликовано сообщение о результатах сравнения выделенных из экстрактов лишайников усниновой кислоты, 1-хлорпаннарина, эпифорелевой кислоты и калицина с используемыми в фотозащитной косметике веществами октилметоксисиннаматом и бутилметоксидибензоилметаном. Показано, что лишайниковые вещества обеспечивают защиту от УФ-излучения, сходную с таковой у названных соединений, а усниновая кислота является хорошим фильтром УФ-Б-излучения [2].

Для гирофоровой, диварикатовой, диффрактовой и усниновой кислот, а также атранорина и паннарина *in vivo* и *in vitro* определены значения SPF, на основании чего эти соедине-

ния названы эффективными солнцезащитными субстанциями. Спектральные характеристики, высокая фотостабильность, слабая растворимость в воде, антиоксидантная активность этих соединений позволяют считать их эффективными фотопротекторами [3].

Béatrice Legouin с соавторами изучали вещества, выделенные из лишайника *Vulpicida pinastri*. Показано, что эти соединения эффективно защищают от УФ-излучения и проявляют высокую антиоксидантную активность. Сочетание усниновой, вульпиновой и пинастровой кислот в одной субстанции усиливает фотозащитную активность. Все соединения не проявляют цитотоксической активности в отношении клеточных культур кератиноцитов и являются фотостабильными в диапазонах УФ-Б и УФ-А [4].

Françoise Lohézic-Le Dévéhat с соавторами оценивали фотозащитные свойства экстрактов из лишайников *Cetraria islandica*, *Lasallia pustulata* и *Usnea hirta*, а также ряда индивидуальных лишайниковых веществ. Экстракт из *Lasallia pustulata* и гирофоровая кислота показали высокие значения SPF, салазиновая кислота лучше, чем аскорбиновая кислота, инактивировала супероксидный радикал, не проявляла фотосенсибилизирующую цитотоксичность [5].

Фотозащитные свойства 3-метоксикарбонил-2-гидрокси-6-метокси-4-метилбензойной, усниновой и декарбокситамноловой кислот, выделенных из лишайника *Usnea roccellina*, описаны в [6]. Данные соединения показали величины SPF, равные $(1,7 \div 1,9)$ при концентрации 10 мкг/мл и $(29,1 \div 31,3)$ при концентрации 200 мкг/мл; а также критическую длину волны $(334 \div 372)$ нм. Декарбоксиметилтамноловая кислота была лучшим антиоксидантом по сравнению с другим выделенным соединением и сырым экстрактом из лишайника.

В работе [7] показано, что лишайниковые вещества сферофорин и паннарин проявляли в отношении плазмидной ДНК защитное действие, подобное эффекту супероксиддисмутазы. На клеточных культурах установлено, что эти метаболиты лишайников ингибируют рост клеток меланомы, вызывая апоптоз клеток, фрагментацию геномной ДНК и значительное увеличение активности каспаз.

Две экспериментальные работы турецкого автора Mehmet Varol посвящены фотозащитным свойствам атранорина и усниновой кислоты [8], а также ряда производных пульвиновой кислоты [9]. Показано, что усниновая кислота и атранорин обладают значительной фотосенсибилизирующей активностью. Однако цитотоксическая, апоптотическая и повреждающая цитоскелет активности атранорина и усниновой кислоты может быть значительным препятствием для их использования в средствах для ухода за кожей человека [8]. По результатам исследования [9] наиболее перспективными фотозащитными соединениями были названы лепрапиновая, пинастровая и вульпиновая кислоты; перспективными – эпанорин и ризокарповая кислота.

В работе [10] приводится обзор патентов на изобретения для составов, где природные соединения используются для фотозащиты. Обсуждается 180 патентов, из которых 25 оцениваются как направленные на применение натуральных продуктов для фотозащиты и предотвращения фотостарения кожи. Показано, что присутствие в фотозащитных средствах антиоксидантов растительного происхождения обеспечивает уменьшение частоты фотокарциногенеза и фотостарения. Использование лишайников, экстрактов из них или отдельных «лишайниковых» веществ в этих патентах не упоминается.

В настоящей работе приводятся результаты разработки биологически активных композиций с антиоксидантными и фотозащитными свойствами на основе экстрактов из лесных лишайников.

Методы исследований. Порядок разработки биологически активных композиций был следующим:

1 в сосновых лесах Гомельского региона (наиболее распространенная лесная формация) выделили группу часто и очень часто встречающихся видов листоватых и кустистых лишайников, образующих в местах произрастания обильную и хорошо отделяющуюся от субстрата биомассу;

2 из этой группы исключили виды, для которых вторичные метаболиты не описаны, имеющие два и более хемотипа, имеющие только одно соединение в качестве вторичного метаболита, а также виды, содержащие алифатические кислоты в качестве вторичных метаболитов;

3 к исследованию приняли 4 вида лишайников: *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach.;

4 отобрали биомассу лишайников в сосновых насаждениях II – VIII классов возраста;

5 в аппарате Сокслета произвели экстракцию биомассы лишайников с использованием ацетона, бензола, гексана, метанола, хлороформа, этанола и этилацетата; удалили растворители, высушили экстракты;

6 приготовили растворы экстрактов в этаноле с концентрацией 200 мкг/мл; выполнили фотометрические и спектрофотометрические измерения, определили величины фотозащитных показателей: SPF, $\lambda_{\text{крит}}$ и УФ-А/УФ-Б;

7 определили общую антиоксидантную и антирадикальную активность полученных экстрактов;

8 исключили из дальнейшего рассмотрения экстракты с невысокими показателями фотозащиты при концентрации 200 мкг/мл;

9 приготовили растворы экстрактов в этаноле с полулетальной для культуры клеток кератиноцитов человека концентрацией (использовали только те экстракты, для которых показано отсутствие цитотоксичности [11]); выполнили фотометрические и спектрофотометрические измерения, определили величины фотозащитных показателей;

10 на основании состава вторичных метаболитов лишайников, чьи экстракты были использованы, создали комбинации экстрактов: в систему вводили полулетальные для культуры клеток кератиноцитов человека концентрации, после чего определили величины фотозащитных показателей;

11 для оптимизации создаваемых композиций в их состав вводили касторовое масло; определяли величины фотозащитных показателей следующих смесей: экстракт из лишайника + касторовое масло и комбинация экстрактов из лишайников + касторовое масло;

12 для субстанций, описанных в пп. 9–12, показавших $\text{SPF} \geq 15,0$, определяли общую антиоксидантную и антирадикальную активность по методикам, описанным в [12].

Результаты и их обсуждение. Решение о группирующем признаке для создания композиций экстрактов из различных видов лесных лишайников принимали на основе химического состава их вторичных метаболитов с использованием данных [13]:

- *C. arbuscula*: фумарпротоцеттаровая, протоцеттаровая и усниновая кислоты;
- *E. prunastri*: усниновая и эверновоя кислоты, атранорин и хлоратранорин;
- *H. physodes*: атранорин и хлоратранорин, физодовая, 3-гидроксифизодовая, физодоловая, 2'-О-метилфизодовая и протоцеттаровая кислоты;
- *R. pollinaria*: усниновая, эверновоя и обтузатовая кислоты.

Очевидно, что только в случае комбинирования экстрактов из *H. physodes* с другими, перечисленными выше, сохраняется вероятность избегания получения цитотоксичных смесей, где к усниновой кислоте из *C. arbuscula* добавится она же из *E. prunastri* или *R. pollinaria* или произойдет суммирование эверновоя кислоты из *E. prunastri* и *R. pollinaria*.

Так как основные показатели фотозащиты субстанций обычно определяют при концентрации 200 мкг/мл, а величины полулетальных для культуры клеток кератиноцитов человека концентраций редко превышают 100 мкг/мл, имело смысл сразу определить SPF смесей экстрактов для исключения неперспективных сочетаний – таблица.

Таблица – Фотозащитные свойства композиций экстрактов из лишайников

Состав	SPF	Состав	SPF
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>C. arbuscula</i> , мет.	$6,8 \pm 0,51$	<i>H. physodes</i> , мет. + <i>C. arbuscula</i> , эт/ац.	$5,6 \pm 0,43$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>C. arbuscula</i> , эт/ац.	$4,0 \pm 0,39$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>C. arbuscula</i> , мет.	$6,6 \pm 0,44$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>E. prunastri</i> , бенз.	$9,8 \pm 0,82$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>E. prunastri</i> , бенз.	$10,1 \pm 0,69$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>E. prunastri</i> , мет.	$10,3 \pm 0,94$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>E. prunastri</i> , мет.	$10,6 \pm 0,87$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>E. prunastri</i> , хл.	$10,7 \pm 0,83$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>E. prunastri</i> , хл.	$11,0 \pm 0,93$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>E. prunastri</i> , эт.	$13,9 \pm 0,99$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>E. prunastri</i> , эт.	$14,9 \pm 0,83$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>E. prunastri</i> , эт/ац.	$15,8 \pm 1,02$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>E. prunastri</i> , эт/ац.	$16,1 \pm 1,06$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>R. pollinaria</i> , ац.	$9,7 \pm 0,72$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>R. pollinaria</i> , ац.	$10,3 \pm 0,82$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>R. pollinaria</i> , бенз.	$8,0 \pm 0,65$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>R. pollinaria</i> , бенз.	$6,7 \pm 0,56$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>R. pollinaria</i> , мет.	$12,6 \pm 0,94$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>R. pollinaria</i> , мет.	$12,9 \pm 1,04$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>R. pollinaria</i> , хл.	$10,3 \pm 0,86$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>R. pollinaria</i> , хл.	$10,5 \pm 0,97$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>R. pollinaria</i> , эт.	$9,0 \pm 0,88$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>R. pollinaria</i> , эт.	$9,3 \pm 0,68$
<i>H. physodes</i> , бенз. + <i>R. pollinaria</i> , эт/ац.	$10,8 \pm 0,94$	<i>H. physodes</i> , хл. + <i>R. pollinaria</i> , эт/ац.	$11,1 \pm 0,86$
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>C. arbuscula</i> , мет.	$5,6 \pm 0,35$	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>C. arbuscula</i> , мет.	$7,4 \pm 0,67$

Окончание таблицы

<i>H. physodes</i> , мет. + <i>C. arbuscula</i> , эт/ац.	8,4 ± 0,66	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>C. arbuscula</i> , эт/ац.	3,8 ± 0,25
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>E. prunastri</i> , бенз.	11,9 ± 0,87	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>E. prunastri</i> , бенз.	11,2 ± 0,93
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>E. prunastri</i> , мет.	12,3 ± 0,94	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>E. prunastri</i> , мет.	11,4 ± 0,84
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>E. prunastri</i> , хл.	14,0 ± 0,99	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>E. prunastri</i> , хл.	11,6 ± 0,88
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>E. prunastri</i> , эт.	16,1 ± 1,12	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>E. prunastri</i> , эт.	15,3 ± 1,08
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>E. prunastri</i> , эт/ац.	18,0 ± 1,15	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>E. prunastri</i> , эт/ац.	19,9 ± 1,57
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>R. pollinaria</i> , ац.	11,8 ± 0,97	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>R. pollinaria</i> , ац.	10,4 ± 0,93
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>R. pollinaria</i> , бенз.	9,2 ± 0,88	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>R. pollinaria</i> , бенз.	7,6 ± 0,69
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>R. pollinaria</i> , мет.	15,9 ± 0,96	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>R. pollinaria</i> , мет.	13,6 ± 1,01
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>R. pollinaria</i> , хл.	11,5 ± 0,87	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>R. pollinaria</i> , хл.	10,7 ± 1,02
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>R. pollinaria</i> , эт.	10,8 ± 0,93	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>R. pollinaria</i> , эт.	9,6 ± 0,79
<i>H. physodes</i> , мет. + <i>R. pollinaria</i> , эт/ац.	13,6 ± 0,95	<i>H. physodes</i> , эт/ац. + <i>R. pollinaria</i> , эт/ац.	12,0 ± 0,99
Обозначения ац., бен., мет., хл., эт. и эт/ац. соответствуют ацетоновым, бензольным, метанольным, хлороформным, этанольным и этилацетатным экстрактам, соответственно.			

Из данных таблицы следует, что практически все композиции экстрактов из лишайников теряют свои фотозащитные свойства при использовании полулетальных для культуры клеток кератиноцитов человека концентраций за исключением этанольных из *E. prunastri* в сочетании с метанольными из *H. physodes*; этилацетатных из *E. prunastri* в сочетании с бензольными, метанольными, хлороформными или этилацетатными из *H. physodes*; а также сочетания метанольных экстрактов из *H. physodes* и *R. pollinaria*.

Одним из способов управления свойствами косметических композиций является введение в их состав растительных масел. Использование растительных масел ограничивается двумя факторами: способностью образовывать липкие пленки при высыхании и их малой растворимостью в этаноле при комнатных и физиологических температурах. Поэтому для улучшения свойств создаваемых композиций нами было выбрано касторовое масло, которое не высыхает, не образует пленку, хорошо растворимо в 96 % растворе этилового спирта, устойчиво к прогорканию, в силу чего широко используется в медицине и ветеринарии. В композиции экстрактов из лесных лишайников мы вводили 10 %, 20 % и 30 % касторового масла, после чего определяли параметры фотозащиты, а также антиоксидантные и антирадикальные свойства – рисунок.

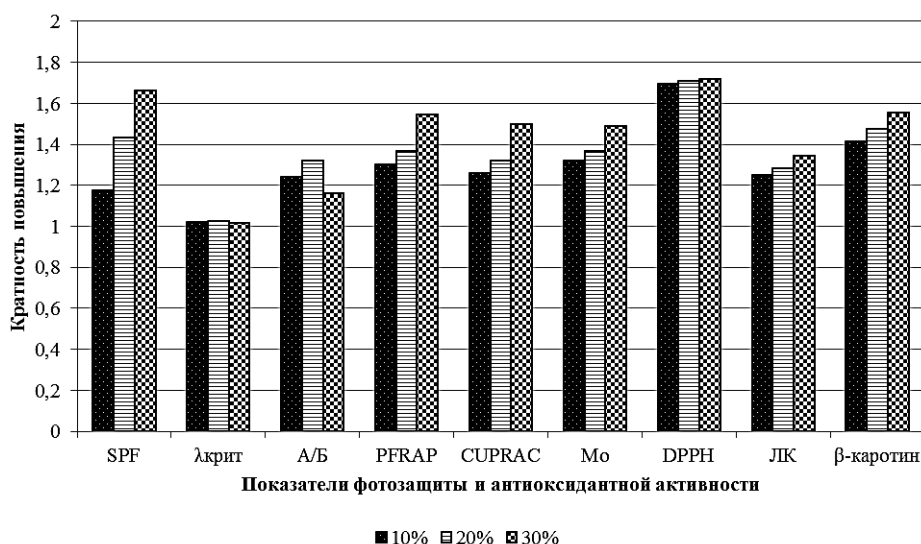


Рисунок – Влияние концентрации касторового масла на фотозащитные и антиоксидантные свойства композиций экстрактов из лесных лишайников (SPF – величина солнцезащитного фактора; $\lambda_{\text{крит}}$ – критическая длина волны; А/Б – величина показателя УФ-А/УФ-Б (меры широты защитных свойств анализируемых субстанций); PFRAP – общая антиоксидантная активность, определенная методом Potassium Ferricyanide Reducing Power; CUPRAC – общая антиоксидантная активность, определенная методом Cupric Reducing Antioxidant Capacity; Мо – общая антиоксидантная активность, определенная фосфомолибденовым методом; DPPH – антирадикальная активность, определенная методом ингибирования DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразила); ЛК – антирадикальная активность, определенная железом-тиоцианатным методом ингибирования перекисного окисления Линолевой Кислоты; β-каротин – антирадикальная активность, определенная методом ингибирования обесцвечивания β-каротина)

Показано, что увеличение концентрации касторового масла в составе композиций экстрактов из лесных лишайников достоверно повышает их фотозащитные свойства в области УФ-Б до 1,75 раз; и не влияет на показатели в области УФ-А. Установлена также тенденция повышения антиоксидантной активности композиций за счет введения в них касторового масла.

При оценке общей антиоксидантной активности композиций экстрактов из лесных лишайников методом PFRAP установлено, что простые смеси экстрактов из лишайников такими свойствами не обладают, тогда как при добавлении касторового масла данный показатель возрастает до 1/3 показателя, определенного для кверцетина в концентрации 200 мкг/мл [14]. К таким композициям относятся: *H. physodes*, бензольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, метанольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, хлороформный + *E. prunastri*, этанольный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, метанольный и *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, метанольный. Показатели общей антиоксидантной активности композиций, определенные методом CUPRAC, практически не с чем сравнивать, кроме работы [15], где процент ингибирования восстановления комплекса Cu(II)–неокупроин аскорбиновой кислотой при концентрации 100 мкг/мл составляет около 80. Подавляющее большинство созданных нами композиций из экстрактов лишайников и касторового масла ингибируют данный процесс примерно на 20 %. Результаты определения фосфомолибденовым методом общей антиоксидантной активности композиций показали, что введение в их состав двадцати и более процентов касторового масла позволяет добиться не менее, чем половинного уровня значений, приведенных в десятках экспериментальных работ двух последних десятилетий.

Процент ингибирования радикала 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (метод DPPH), перекисного окисления линолевой кислоты (железо-тиоцианатный метод), а также обесцвечивания β-каротина не превышал 30, что в целом соответствует литературным данным. Для концентрации α-токоферола 1 мг/мл определенный нами тремя перечисленными методами процент ингибирования составил $61,8 \pm 0,96$; $79,6 \pm 1,54$ и $51,2 \pm 0,62$, соответственно [16]. Так как использованные нами концентрации экстрактов из лишайников в сумме не превышали 200 мкг/мл, полученные данные легко объясняются разведением растворов.

Ниже приводим составы экспериментальных образцов антиоксидантных и фотозащитных добавок к косметическим средствам на основе экстрактов из лесных лишайников.

I Этиловый спирт + касторовое масло (10 %) + экстракты из лишайников:

H. physodes, метанольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, метанольный;

II Этиловый спирт + касторовое масло (20 %) + экстракты из лишайников:

H. physodes, бензольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, бензольный + *R. pollinaria*, хлороформный; *H. physodes*, метанольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, хлороформный + *E. prunastri*, этанольный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, хлороформный; *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, хлороформный;

III Этиловый спирт + касторовое масло (30 %) + экстракты из лишайников:

H. physodes, бензольный + *E. prunastri*, бензольный; *H. physodes*, бензольный + *E. prunastri*, метанольный; *H. physodes*, бензольный + *E. prunastri*, хлороформный; *H. physodes*, бензольный + *E. prunastri*, этанольный; *H. physodes*, бензольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, бензольный + *R. pollinaria*, хлороформный; *H. physodes*, бензольный + *R. pollinaria*, этанольный; *H. physodes*, метанольный + *E. prunastri*, этанольный; *H. physodes*, метанольный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, метанольный + *R. pollinaria*, хлороформный; *H. physodes*, метанольный + *R. pollinaria*, этанольный; *H. physodes*, хлороформный + *E. prunastri*, метанольный; *H. physodes*, хлороформный + *E. prunastri*, этанольный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, хлороформный; *H. physodes*, хлороформный + *R. pollinaria*, этанольный; *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, метанольный; *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, хлороформный; *H. physodes*, этилацетатный + *R. pollinaria*, этанольный.

Закключение. Таким образом, созданы экспериментальные образцы составов, представляющих собой растворы в этаноле экстрактов из лесных лишайников в сочетании с касторо-

вым маслом. Концентрации экстрактов из лишайников не превышали полулетальные для культур кератиноцитов человека (HACaT), касторового масла – 30 %. Созданные экспериментальные образцы характеризуются высоким и очень высоким уровнями фотозащиты в области УФ-Б; средней широтой защиты в области УФ-Б + УФ-А; средней и ниже среднего эффективностью в области УФ-А, а также довольно слабой общей антиоксидантной и антирадикальной активностью. По совокупности показателей созданные экспериментальные образцы не являются собственно фотозащитными, но могут быть рекомендованы в качестве добавок в солнцезащитные средства.

Исследование проводилось в рамках ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия, подпрограмма «Лесохимия-2», задание 2.4.01.04, № ГР 20211711.

Литература

1. Nichols, J. A. Skin photoprotection by natural polyphenols : Anti-inflammatory, antioxidant and DNA repair mechanisms / J. A. Nichols, S. K. Katiyar // Archives of Dermatological Research. – 2010. – Vol. 302. – P. 71–83.
2. Protection against UVB irradiation by natural filters extracted from lichens / F. Rancan [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology. – 2002. – Vol. 68 (2–3). – P. 133–139.
3. Lichen metabolites as UVB filters / E. Fernández [et al.] // Cosmet. Toiletries. – 1996. – Vol. 111. – P. 69–74.
4. Specialized Metabolites of the Lichen *Vulpicida pinastri* act as photoprotective agents / B. Legouin [et al.] // Molecules. – 2017. – Vol. 22 (7). – P. 1162–1179.
5. Lichenic extracts and metabolites as UV filters / F. Lohézic-Le Dévéhat [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology. – 2013. – Vol. 120. – P. 17–28.
6. Rojas, J. L. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes / J. L. Rojas, M. Díaz-Santos, N. A. Valencia-Islas // UK J Pharm Biosci. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–26.
7. Lichen metabolites prevent UV light and nitric oxide-mediated plasmid DNA damage and induce apoptosis in human melanoma cells / A. Russo [et al.] // Life Sci. – 2008. – Vol. 83. – P. 468–474.
8. Evaluation of the sunscreen lichen substances usnic acid and atranorin / M. Varol [et al.] // BIOCELL. – 2015. – Vol. 39 (1). – P. 25–31.
9. Varol, M. Photoprotective properties of natural pulvinic acid derivatives to ward ultraviolet-Induced damages / M. Varol // International Journal of Secondary Metabolite. – 2018. – Vol. 5 (4). – P. 319–330.
10. Natural compounds for solar photoprotection : A patent review / M. Serafini [et al.] // Expert Opin Ther Patents. – 2014. – Vol. 25 (4). – P. 467–478.
11. Матвеенков, М. В. Цитотоксические и фотомодифицирующие свойства экстрактов из пространенных лишайников юго-востока Беларуси / М. В. Матвеенков, О. М. Храменкова, И. А. Чешик // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 65–75.
12. Храменкова, О. М. Антиоксидантные и цитотоксические свойства экстрактов из лишайников / О. М. Храменкова. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – 224 с.
13. CNALH [Electronic resource]. – Access mode : <https://lichenportal.org>. – Data of access : 29.03.2021.
14. Dzomba, P. Phytochemicals, antioxidant and antibacterial properties of a lichen species *Cladonia digitata* / P. Dzomba, E. Togarepi, C. Musekiwa // African Journal of Biotechnology. – 2012. – Vol. 11 (31). – P. 7995–7999.
15. In vitro assessment of antioxidant and antimicrobial activities of different solvent extracts from lichen *Ramalina nervulosa* / J. P. Sundararaj [et al.] // International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. – 2015. – Vol. 7 (8). – P. 200–204.
16. Храменкова, О. М. Антирадикальная активность экстрактов из лишайников / О. М. Храменкова // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2023. – № 3 (138) – С. 51–55.

Информатика

УДК 004.932

EDN: KIJYJR

Эффективность расчёта и трудности при расчете расстояния до обзораемого с использованием системы с одной камерой без калибровки

А.В. Воружев, К.С. Голубич, Д.С. Сыч, Е.В. Рафалова

Работа исследует эффективность и сложности расчёта расстояния до объектов с использованием системы на основе одной камеры без калибровки. Рассмотрены преимущества таких систем. Предложен алгоритм расчёта расстояния на основе параметров камеры и характеристик объекта, реализованный на Python с использованием метода каскадных признаков Хаара. Тестирование показало погрешность в пределах 3–8 %, что делает систему применимой в областях, где высокая точность не критична, таких как безопасность, видеонаблюдение, медицина и автомобильные технологии.

Ключевые слова: компьютерное зрение, однокамерная система, расчёт расстояния, каскадные признаки Хаара.

The study examines the effectiveness and challenges of calculating the distance to objects using a single-camera system without calibration. The advantages of such systems, including their cost-effectiveness and simplicity, are discussed, and an algorithm for distance calculation based on camera parameters and object characteristics is proposed, implemented in Python using the Haar cascade method. Testing revealed an error margin of 3–8 %, making the system applicable in areas where high precision is not critical, such as security, video surveillance, medicine, and automotive technologies.

Keywords: computer vision, single-camera system, distance calculation, Haar cascade features.

Введение. В последние десятилетия технологии компьютерного зрения шагнули далеко вперёд, современные системы распознавания способны точно распознавать объекты и расстояние до них с использованием различного рода датчиков, сенсоров и при использовании как минимум пары камер. При этом системы, основанные на использовании одной камеры, стали популярными благодаря их относительной дешевизне, компактности и широким возможностям применения. Однако отсутствие калибровки камеры и ограниченность данных, получаемых из одного источника, создают существенные проблемы в точности и надёжности таких систем.

Основной проблемой при расчёте расстояния с использованием системы с одной камерой является многозначность изображения, возникающая из-за плоской природы двумерных изображений [1]. Камера, получая изображение, не в состоянии напрямую измерить расстояние до объекта, поскольку на изображении отсутствует информация о глубине.

Одним из преимуществ использования системы с одной камерой является её относительная простота и дешевизна. Камера, в отличие от более сложных систем, таких как лидары или стерео-камеры, требует гораздо меньше ресурсов, как в плане оборудования, так и в плане вычислительных мощностей. Система с одной камерой без калибровки не требует точных настроек, что может существенно уменьшить сложность разработки и настройки системы. В приложениях, где требуется компактность и малый вес, такие решения являются предпочтительными.

Однако в сравнении с другими методами, такими как стерео-визия или использование лидаров, системы с одной камерой имеют явные ограничения. Стереовизия использует пару камер для создания глубинных карт, что позволяет более точно определять расстояние за счёт анализа различий в изображениях с разных точек обзора. Этот метод значительно повышает точность расчёта расстояния, но требует более сложной настройки и синхронизации камер, а также дополнительной вычислительной мощности для обработки данных.

Системы, использующие лидары, обеспечивают более точные измерения расстояний за счёт активного излучения лазера и измерения времени его возврата. Однако такие системы более дороги и сложны в реализации, а также требуют более сложных алгоритмов для обра-

ботки данных. В то время как система с одной камерой не может достичь той же точности, что и лидар или стерео-система, её простота и дешевизна делают её подходящей для менее критичных приложений [2].

Пример расчета. В связи с причинами, указанными выше, необходимо обозначить параметры, которые имеют вид констант или зависят от характеристик каждой камеры или от применяемого алгоритма распознавания лица на кадре [3]. Данные параметры: α – угол обзора камеры, l – константа равная средней ширине лица человека, k – коэффициент размера лица, необходим для настройки параметра размера лица, при сглаживании неточности нахождения лица на фото каскадными признаками Хаара, H – ширина разрешения камеры.

Далее представлены рассчитываемые параметры: D – угловой диаметр, h_{Π} – ширина лица в пикселях, L – искомое расстояние.

Изначальная формула расчета расстояния имеет вид:

$$L = \frac{D}{2 * tg(\frac{\alpha}{2})} \quad (1)$$

Однако необходимо учесть, что α – базовая характеристика камеры и необходимо рассчитать D :

$$D = \frac{l * H}{h_{\Pi} * k} \quad (2)$$

Итоговая формула имеет вид:

$$L = \frac{l * H}{2 * tg(\frac{\alpha}{2}) * h_{\Pi} * k} \quad (3)$$

Ниже на картинке 1 представлена визуализация основных параметров.

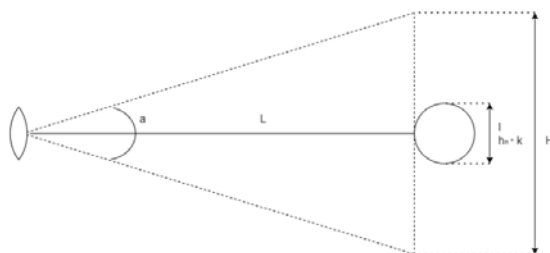


Рисунок 1 – Визуализация основных параметров

Алгоритм работы и реализация. Для реализации данного алгоритма был использован язык Python, с помощью которого был написан программный комплекс, который подразумевает использование вышеописанного алгоритма для расчета расстояния до пользователя. Основные этапы работы программного комплекса включают в себя: сбор данных об используемом оборудовании, подключение к камере и инициализация оконного интерфейса, получение кадра с камеры, распознавание лица и расчет основных параметров лица, расчет расстояния до пользователя и вывод данных на экран. Этапы и пример работы представлены на рисунке 2 и рисунке 3.

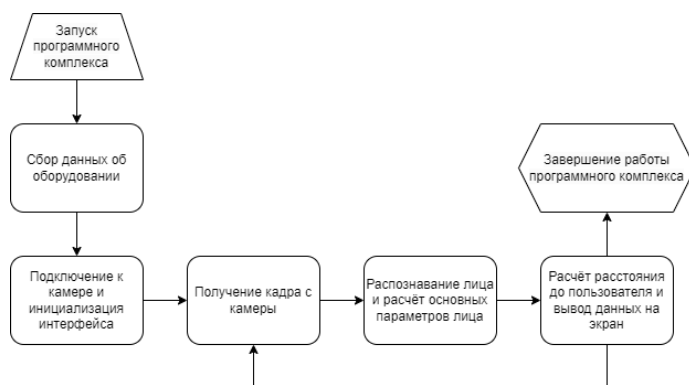


Рисунок 2 – Этапы работы программного комплекса

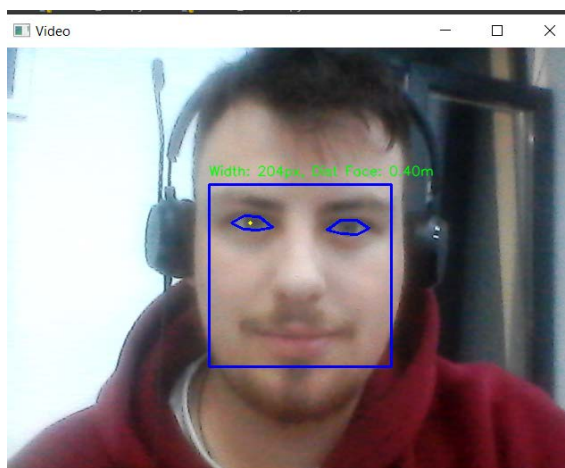


Рисунок 3 – Пример работы программного комплекса

Тестирование точности работы алгоритма. Составим таблицу для расчета точности расстояния до обозреваемого, а также график точности для измерения погрешности алгоритма от расстояния до пользователя (рисунок 4).

Таблица 1 – Расчет точности измерений

Реальное расстояние, м	Измеренное расстояние, м	Погрешность, %
0,25	0,24	4.00
0,50	0,52	3.90
0,75	0,71	5.43
1,00	0,97	3
1,25	1.15	8.00

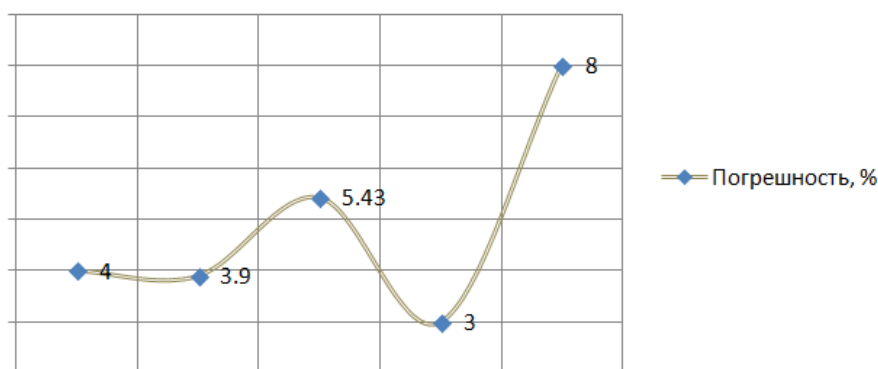


Рисунок 4 – График точности системы от расстояния

Сферы применения. Данный алгоритм может использоваться в системах безопасности и видеонаблюдения для определения расстояния до подозрительных объектов или лиц, а также для идентификации людей на расстоянии. В сфере человеко-компьютерного взаимодействия такая система может улучшить пользовательский опыт в видеозвонках и онлайн-играх, адаптируя интерфейс в зависимости от расстояния до пользователя.

В медицине система может применяться для мониторинга состояния пациентов, например, для оценки дыхания или других физиологических параметров на расстоянии. В образовании и дистанционном обучении она может использоваться для оценки вовлеченности студентов, определяя, насколько близко они находятся к экрану.

В розничной торговле и маркетинге система может анализировать поведение покупателей в магазинах, определяя, как близко они подходят к продуктам, и предлагать персонализированные предложения и рекламу. В автомобильных технологиях система может использоваться в системах помощи водителю для определения расстояния до пассажиров или объектов в автомобиле.

Работа программы. Так же стоит поговорить немного про работу программного комплекса. Основная информация выводится на оконный интерфейс программы, однако при работе программы все данные выводятся в файл логирования, пример которого представлен на рисунке 5.

```
INFO: __main__:Start program!!!
Time:2025-01-08 14:04:56.992368;
Frame width: 640.0;
Camera angle: 60;
Mean face width: 0.16;
Cascade coef: 1.1;

INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.172218; Face width (px): 132; Distantion: 0.6107506979857199;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.292221; Face width (px): 121; Distantion: 0.6662734887116943;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.365220; Face width (px): 121; Distantion: 0.6662734887116943;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.419219; Face width (px): 121; Distantion: 0.6662734887116943;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.476214; Face width (px): 124; Distantion: 0.6501539688235083;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.552223; Face width (px): 122; Distantion: 0.6608122306075002;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.612218; Face width (px): 122; Distantion: 0.6608122306075002;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.666216; Face width (px): 123; Distantion: 0.6554397734480896;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.721217; Face width (px): 120; Distantion: 0.6718257677842918;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.776213; Face width (px): 124; Distantion: 0.6501539688235083;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.830220; Face width (px): 124; Distantion: 0.6501539688235083;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.886219; Face width (px): 122; Distantion: 0.6608122306075002;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:58.969218; Face width (px): 123; Distantion: 0.6554397734480896;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:59.021216; Face width (px): 122; Distantion: 0.6608122306075002;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:59.078216; Face width (px): 123; Distantion: 0.6554397734480896;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:59.130221; Face width (px): 124; Distantion: 0.6501539688235083;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:59.182217; Face width (px): 125; Distantion: 0.6449527370729202;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:59.236214; Face width (px): 125; Distantion: 0.6449527370729202;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:04:59.311218; Face width (px): 125; Distantion: 0.6449527370729202;
INFO: __main__:Timestamp: 2025-01-08 14:05:00.167221; Face width (px): 126; Distantion: 0.6398340645564684;
INFO: __main__:Stop program!!! Time:2025-01-08 14:01:00.525725;
```

Рисунок 5 – Файл логирования

Помимо выше перечисленного так же стоит внимания метод реализации данного алгоритма вычисления на языке программирования Python. Пример псевдокода:

```
# Читаем кадр из веб-камеры и отзеркаливаем, спроверкой на ошибку подключения
ret, frame = cap.read()
frame = flip(frame, 1)
if not ret:
    break
# Преобразуем кадр в градации серого и обнаруживаем лица
gray = cvtColor(frame, COLOR_BGR2GRAY)
faces = face_cascade.detectMultiScale(gray)
# Если есть хотя бы одно лицо, то ищем расстояние до него
if len(faces) >= 1:
    # Получение расположения лица на кадре
    x, y, w, h = faces[0]
    # Рисуем рамку вокруг лица
    rectangle(frame, (x, y), (x + w, y + h), (255, 0, 0), 2)
    dist_to_face = (IMAGE_WIDTH * FACE_WIDTH) / ((2 * tan(CAMERA_ANGLE / 2 * pi
/ 180)) * (w * CASCADE_COEF))
    # Добавляем текст с шириной лица и дистанцией
    putText(frame, f'Width: {w}px, Dist to Face: {dist_to_face:.2f}m', (x, y -
10), FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5,
            (0, 255, 0), 1, LINE_AA)
    # Вывод в лог
    logger.info(f"Timestamp: {datetime.now()}; Face width (px): {w}; Distantion:
{dist_to_face};")
```

Заключение. Вследствие особенностей работы с плоским изображением и необходимостью применять некоторые параметры константными данная система имеет значимую погрешность, что определяет сферы её использования вне пределов точных исследований. Однако простота использования, настройки, разработки, а так же минимальный необходимый перечень используемых технических средств позволяют использовать данную систему в качестве простого и дешёвого аналога дорогих и более масштабных систем.

Литература

1. Рудой, М. Т. Распознавание состояния оператора системы средствами дополненного интеллекта / М. Т. Рудой // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXVI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 20–22 марта 2023 г. : в 2 ч. / М-во образования РБ, ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: С. П. Жогаль [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – Ч. 2. – С. 170.
2. Sych, D. S. Forms of representation of 3D data for machine learning / D. S. Sych, N. A. Aksionova // Актуальные вопросы физики и техники : сб. матер. XII Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 20 апреля 2023 г. / М-во образования Республики Беларусь, ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – С. 523–524.
3. Demidenko, O. M. Identification of students' faces in a video stream using the Viola-Jones method / O. M. Demidenko, N. A. Aksionova, A. V. Varuyeu // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – Astrakhan, 2022. – P. 1–5.
4. Demidenko, O. M. Implementation of the identification and recognition system cognitive behavior of the observed / O. M. Demidenko, N. A. Aksionova, A. V. Varuyeu // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер., Математика. Механика. Информатика. – 2024. – № 24. – С. 275–296.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 31.03.2025

Использование технологий искусственного интеллекта для автоматизированной оценки знаний

О.П. РЯБЧИНА, О.Р. ХОДАСЕВИЧ

Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в образовательных системах может революционизировать персонализированное обучение. В этой статье рассматривается применение технологий ИИ для адаптации образовательного опыта к индивидуальным потребностям, предпочтениям и способностям. Результаты показывают, что при тщательном дизайне и управлении ИИ может значительно повысить качество и доступность образования, проложить путь к более инклюзивной и эффективной учебной среде.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационные технологии, образование, интеллектуальная система для автоматической оценки знаний.

The integration of artificial intelligence (AI) in educational systems has the potential to revolutionize personalized learning. This paper explores the application of AI technologies to tailor educational experiences to individual student's needs, preferences, and abilities. The findings suggest that with careful design and governance, AI can significantly enhance the quality and accessibility of education, paving the way for a more inclusive and effective learning environment.

Keywords: artificial intelligence, information technology, education, intelligent system for automated knowledge assessment.

Введение. Современные образовательные системы сталкиваются с актуальной задачей внедрения инновационных подходов для мониторинга и оценки уровня знаний обучающихся. Ускоренный рост популярности дистанционного обучения и онлайн-курсов трансформирует традиционные образовательные процессы, что усложняет достижение качественных и справедливых оценок знаний. В этих условиях возрастает потребность в использовании современных технологий, таких как искусственный интеллект, блокчейн и адаптивные обучающие платформы, которые обеспечивают объективность и повышают эффективность оценочной деятельности. Автоматизация процесса оценивания посредством внедрения данных технологий минимизирует влияние человеческого фактора, снижая вероятность субъективных ошибок. Это особенно важно в условиях увеличения числа обучающихся, получающих образование удалённо, что требует пересмотра устаревших подходов к проверке знаний [1]. Приоритетными аспектами таких изменений становятся обеспечение достоверности результатов и повышение их объективности, что способствует улучшению качества образовательных процессов в целом.

ИИ находит широкое применение в сфере образования, предоставляя возможности для персонализации обучения, автоматизации оценки знаний и повышения доступности. Он адаптирует учебные материалы под индивидуальные потребности обучающихся, создаёт объективные системы проверки успеваемости, а также обеспечивает круглосуточную поддержку через обучающие чат-боты. Кроме того, ИИ анализирует учебные данные для выявления проблем в обучении, разрабатывает образовательные материалы, способствует повышению доступности для обучающихся с особыми потребностями и облегчает работу преподавателей, автоматизируя рутинные задачи. Эти технологии трансформируют образовательный процесс, делая его более эффективным, доступным и индивидуально ориентированным [2].

В условиях усложнения процессов контроля знаний обучающихся и необходимости повышения их объективности возникает потребность в создании специализированных программных средств, адаптированных для использования с ИИ. Такие инструменты могут обеспечить высокую точность оценки и автоматизировать рутинные задачи, связанные с проверкой знаний.

Основная часть. Разработка и внедрение автоматизированных систем оценки знаний с применением ИИ представляют собой важный шаг в эволюции образовательного процесса. Эти технологии обеспечивают не только повышение объективности оценки, но и значительное

упрощение трудоемких процедур проверки знаний. Автоматизированная система оценки знаний помогает студентам и преподавателям сосредоточиться на обучении и усовершенствовании компетенций, минимизируя административные задачи и человеческий фактор в процессе проверки. Данная работа является вкладом в развитие современных технологий, способных улучшить образовательную среду и адаптировать её к требованиям цифрового века.

Разработанная автоматизированная система оценки знаний с применением ИИ представляет собой комплексное программное решение, предназначенное для упрощения и автоматизации процесса проверки знаний студентов. Система работает на основе новейших технологических решений, что обеспечивает высокую точность и надёжность оценок [2]. Студенты отправляют свои ответы, после чего система регистрирует их и запускает процесс создания задач для проверки. Эти задачи обрабатываются в порядке очереди, где каждый ответ анализируется на полноту и корректность с помощью специальных алгоритмов.

В данном контексте ИИ играет ведущую роль в обеспечении автоматизации процесса проверки ответов без участия человека. Использование методов машинного обучения даёт системе возможность не только корректно оценивать правильность решений, но и анализировать глубину проработки и степень соответствия установленным критериям. Такой подход позволяет значительно повысить объективность оценок и обеспечить более точный и всесторонний анализ работ обучающихся.

Поскольку приложение может предоставлять сервис для любого вуза страны, то возникает необходимость в идентификации учреждения образования в системе. Поэтому процесс взаимодействия с системой начинается с регистрации учреждения образования на платформе и состоит из нескольких шагов. На начальном этапе указывается наименование учреждения образования, затем выбирается его вышестоящая организация (например, министерство) из доступного списка. Далее вводится поддомен, который будет использоваться для создания официального электронного адреса учреждения. Следующим шагом заполняется поле электронной почты, соответствующее введённому поддомену. В следующем разделе вводится адрес учреждения образования, включая город, улицу, номер здания и почтовый индекс.

Далее необходимо предоставить контактные данные представителя вуза. В дополнительных полях можно добавить описание учреждения образования, загрузить логотип и указать его тип. После заполнения всех требуемых полей и загрузки логотипа в одном из поддерживаемых форматов (JPG, PNG, SVG, WEBP) процесс регистрации завершается нажатием кнопки. Этот этап позволяет собрать всю необходимую информацию о вузе для её последующего использования в системе управления (рисунок 1).

Добавление ВУЗа

Наименование ВУЗа

Представитель (ФИО)

Контактный номер

Вышестоящая организация (министерство)

Министерство образования Республики Беларусь

Поддомен

.edu.ai.by

E-mail адрес

Адрес (Город, Улица, Номер Дома, Индекс)

Логотип ВУЗа

Нажмите для загрузки или перетащите файл

JPG, PNG, SVG, WEBP

ЗАРЕГИСТРИРОВАТЬ ВУЗ В СИСТЕМЕ

Рисунок 1 – Регистрация вуза в системе

Следующий этап включает процесс добавления образовательной программы в систему через интерфейс веб-платформы и состоит из нескольких последовательных шагов. В первую очередь необходимо ввести нужную информацию о программе, включающую её наименование, подробное описание, регистрационный номер и учебный план, в который входит данный курс или модуль. Также предоставляется возможность прикрепить документы и другие файлы, подтверждающие учебный план или описывающие его структуру.

Далее вводятся данные о типе программы и её статусе, что даёт системе возможность классифицировать и эффективно управлять образовательными данными. В дополнение к этому задаются параметры актуализации программы, которые определяют, как часто её содержание должно пересматриваться и обновляться. На завершающем этапе предусмотрена возможность настройки дополнительных параметров, включая детализированные настройки, соответствующие условиям использования образовательной программы.

После завершения ввода и проверки всех данных необходимо подтвердить их и сохранить в системе, что делает программу доступной для дальнейшего использования или разработки в зависимости от её текущего статуса. Этот процесс позволяет систематизировать добавление новых образовательных программ, обеспечивая повышение качества учебного контента и его соответствие современным образовательным стандартам (рисунок 2).

Добавление программы

Рисунок 2 – Добавление образовательной программы

Процесс создания экзамена начинается с определения ключевых характеристик, таких как название, дисциплина, к которой относится экзамен, и выбор формата его проведения. Формат может включать письменные, устные экзамены или компьютерное тестирование. Следующим этапом разрабатывается структура экзамена, где задается последовательность разделов и типы вопросов. Вопросы могут включать множественный выбор, открытые задачи или задания на установление соответствий. Для каждого из вопросов устанавливаются баллы, что позволяет задать чёткие критерии для оценки уровня знаний студентов.

Затем создается вопросная база для экзамена, которая должна быть достаточно объёмной для того, чтобы полноценно оценить знания и навыки студентов по данной дисциплине. Важно, чтобы каждый вопрос соответствовал учебной программе и целям курса, что требует тщательной подготовки и проверки на соответствие образовательным стандартам.

После формирования базы вопросов, необходимо задать параметры проведения экзамена, такие как время выполнения, правила прохождения и минимальный порог баллов для успешной сдачи. После этого экзамен готов к использованию и может быть предложен обучающимся в рамках образовательного процесса. Этот последовательный алгоритм позволяет создать структурированный и эффективный механизм оценки, который способствует улучшению качества обучения.

Процесс прохождения аттестации начинается с выбора активного экзамена из доступного на платформе списка. После этого обучающийся получает информацию о структуре экзамена, включая количество вопросов и общее время, выделенное на его прохождение (рисунок 3). Далее обучающийся вводит свои учетные данные для получения доступа к экзаменационным материалам, и начинается выполнение экзаменационных заданий [3].

А
↺

Подготовка
2 Экзамен
3 Результат

Общая информация



**80
ГАДОЎ
ВЫЗВАЛЕННЯ
БЕЛАРУСІ**

История Беларуси 80-летие освобождения Беларуси

Структура экзамена

- > Теоретический раздел: включает текстовые вопросы.
- > Язык: русский язык

Учебная программа

Великая Отечественная война
Великая Отечественная война Советского народа (в контексте второй мировой войны)

[Скачать программу](#)

Экзамен

Экзамен: История Беларуси
Описание: 80-летие освобождения Беларуси
Преподаватель: Education AI

Кол-во вопросов: 3
Продолжительность: 21 минут

ПРИСТУПИТЬ

Список вопросов экзамена

1. Какие исторические факты Вам известны про Белорусскую стратегическую наступательную операцию?

- Ответ должен включать дату начала, дату окончания и два известных факта о Белорусской стратегической наступательной операции.
- Продолжительность ответа: 5 мин.

2. Какие исторические факты Вам известны про освобождение столицы Беларуси Минска от немецко-фашистских захватчиков?

- Ответ должен включать дату освобождения и два известных факта об освобождении Минска от немецко-фашистских захватчиков.
- Продолжительность ответа: 6 мин.

3. Какие исторические факты Вам известны про первый освобожденный от немецко-фашистских захватчиков областной центр Беларуси?

- Ответ должен включать два известных факта о первом освобожденном областном центре Беларуси, а также дату освобождения.

7. Какие исторические факты Вам известны про французский авиаполк, который принимал участие в освобождении Беларуси?

- Ответ должен включать два известных факта о французском авиаполке, участвовавшем в освобождении Беларуси.
- Продолжительность ответа: 7 мин.

8. Что вы знаете про подвиг Трифона Лукьяновича?

- Ответ должен включать два известных факта о подвиге Трифона Лукьяновича.
- Продолжительность ответа: 7 мин.

9. Чем знаменита участница Великой Отечественной войны, Герой Советского Союза Зинаида Туснолобова-Марченко?

- Ответ должен включать два известных факта о Зинаиде Туснолобовой-Марченко, которыми она знаменита.
- Продолжительность ответа: 6 мин.

Рисунок 3 – Экзаменационная программа

Во время аттестации обучающийся отвечает на вопросы, представленные в различных форматах – тестовом или письменном. Каждый вопрос требует времени для осмысления и формулировки ответа. В зависимости от типа вопросов, ответы могут быть даны в форме выбора из предложенных вариантов или в виде развернутого ответа, требующего детального объяснения или аргументации.

Обучающиеся отвечают на вопросы в установленное время, после чего их ответы автоматически передаются на оценку ИИ через интерфейсы API (рисунок 4). ИИ оперативно и объективно анализирует результаты, устраняя субъективность и обеспечивая прозрачность оценок (рисунок 5). Платформа предоставляет детализированные отчеты и рекомендации, способствуя совершенствованию учебного процесса и углубленной оценке знаний учащихся. Данный процесс предоставляет обучающемуся объективную оценку его знаний по дисциплине и помогает улучшить навыки на основе полученной обратной связи.

Этот подход не только способствует повышению качества оценивания, но и создаёт условия для дальнейшего развития обучающихся, позволяя им корректировать и совершенствовать свои знания и умения.

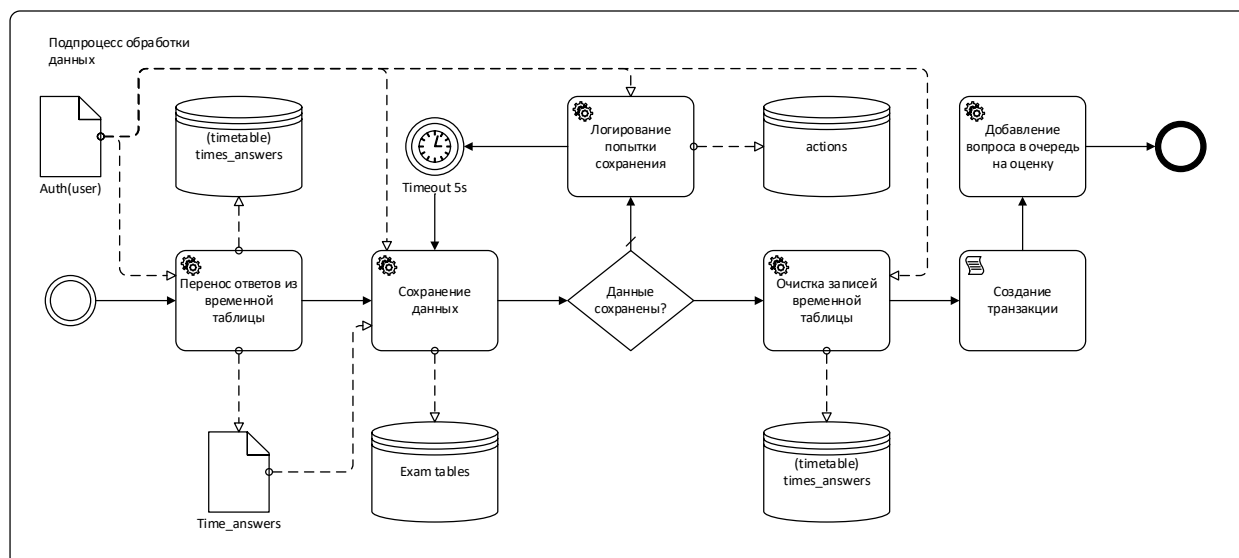


Рисунок 4 – Добавление вопроса в очередь

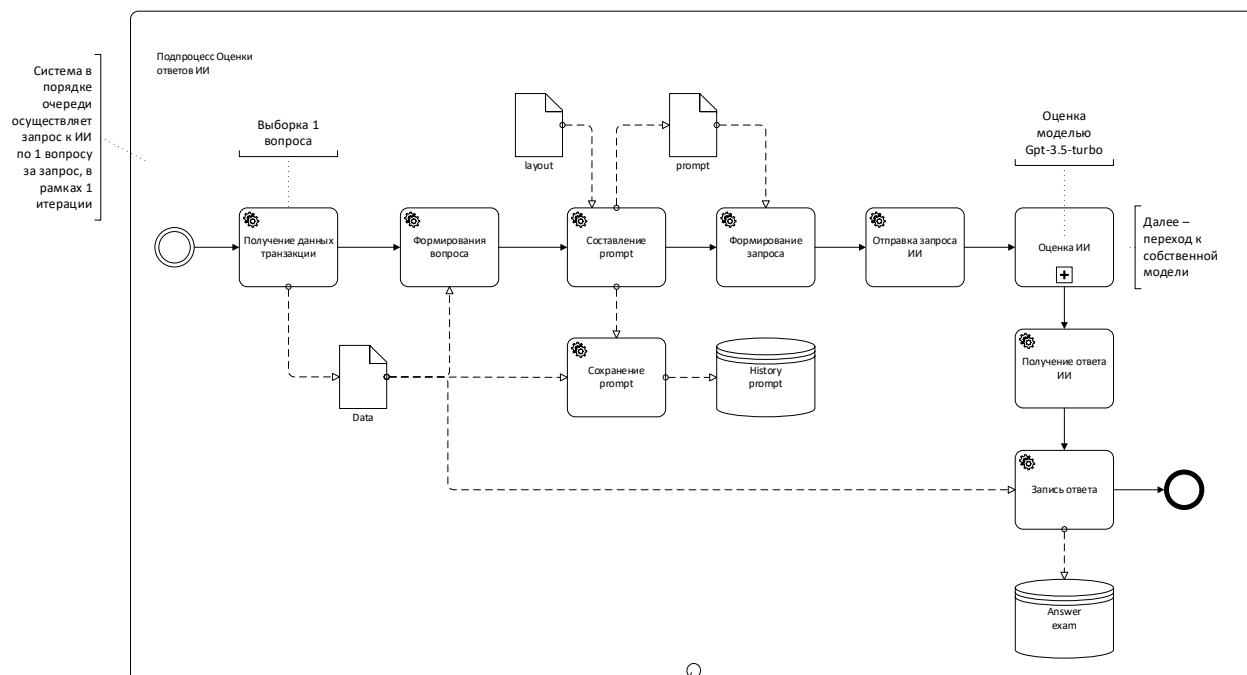


Рисунок 5 – Формирование ответа ИИ на один вопрос из очереди

После завершения экзамена результаты становятся доступны как обучающемуся, так и преподавателю в виде детализированной обратной связи. Она включает в себя итоговую оценку, а также данные о времени, затраченном на выполнение экзаменационных заданий. Помимо этого, система отображает все ответы обучающегося с подробным разбором каждого вопроса. Включаются пояснения правильных ответов, а также указания на допущенные ошибки и некорректные решения.

Такая система предоставления обратной связи позволяет обучающемуся не только видеть свою общую успеваемость, но и получать конкретные рекомендации по улучшению, что способствует более глубокому пониманию учебного материала и исправлению пробелов в знаниях (рисунок 6).

Education 

Итоговый результат

Итоговая оценка: 10
Продолжительность: 00:00:55

Инф. об учащемся

Имя: Demo User
Email: demo@edu-ai.by

Информация

Начало: 2024-06-15 21:05:54
Конец: 2024-06-15 21:06:49
Устройство: WebKit
Браузер: Chrome
ОС: Windows
Версия ОС: 10.0
Вопросов (текст): 3
Вопросов (код): 0

Действия пользователя (12)

Событие	Данные	Кол-во
CTRL + C		
LEAVE	Покидание вкладки.	
CTRL + V		
PASTE	Рельсовая война была одной из важнейших партизанских операций во время Великой Отечественной войны...	
CTRL + C		

Ответы и оценка

В ходе прохождения были выявлены нарушения! Кол-во нарушений: 3 шт.

Какие исторические факты Вам известны о рельсовой войне, проводившейся в период Великой Отечественной войны?

Ответ пользователя: Рельсовая война была одной из важнейших партизанских операций во время Великой Отечественной войны. Вот два известных факта об этой операции: 1. "Масштаб и цель операции": Рельсовая война была крупномасштабной партизанской операцией, начатой в августе 1943 года и продолжалась до конца войны. Ее целью было разрушение железнодорожных путей, мостов и объектов железнодорожной инфраструктуры для нарушения снабжения и передвижения немецких войск. Партизаны подрывали рельсы, уничтожали мосты и устраивали диверсии на стратегически важных участках железнодорожных путей, чтобы затруднить передвижение немецкой армии и нарушить их логистику. 2. "Успех и влияние": Операция оказала значительное влияние на ход войны. Например, в результате действий партизан было уничтожено более 200 тысяч рельсов и выведено из строя множество железнодорожных объектов. Это привело к серьезным сбоям в снабжении немецких войск, что затруднило проведение ими военных операций. Рельсовая война стала одной из причин, по которым немецкая армия испытывала трудности с пополнением запасов и подкреплений на Восточном фронте.

Оценка: 10.

Обоснование: Ответ полностью соответствует требованиям вопроса. Пользователь предоставил два конкретных факта о рельсовой войне, подробно описав масштаб и цель операции, а также ее успех и влияние на ход Великой Отечественной войны. Информация представлена точно и развернуто.

Рекомендации: Улучшения не требуются, ответ полный и информативный.

Какие исторические факты Вам известны про первый освобожденный от немецко-фашистских захватчиков районный центр Беларуси?

Ответ пользователя: Первым районным центром Беларуси, освобожденным от немецко-фашистских захватчиков, был город Комарин. Вот два известных факта об этом событии: 1. "Дата освобождения": Комарин был освобожден 23 ноября 1943 года. Это событие стало важным этапом в ходе наступательных операций советских войск на территории Беларуси. 2. "Значимость освобождения": Освобождение Комарина имело большое стратегическое значение, так как это был первый районный центр в Беларуси, который удалось освободить от немецкой оккупации. Это событие подняло моральный дух советских войск и местного населения, став символом начала освобождения белорусских земель от немецко-фашистских захватчиков.

Рисунок 6 – Отчёт сдачи экзамена

Кроме того, система может выявлять нарушения, такие как дублирование / копирование информации или иные проявления академической нечестности, предоставляя конкретные примеры из ответов обучающихся. Эти данные используются для корректировки итоговой оценки и могут существенно повлиять на окончательное решение по результатам экзамена.

Заключение. Внедрение и интеграция этой системы создаёт комплексную платформу для эффективного проведения и оценки экзаменов с использованием новейших технологий. Применение ИИ в системе позволяет автоматизировать многие административные задачи и оценку ответов, снижая риск субъективности и повышая точность и объективность оценивания. Важным преимуществом системы является её адаптивность к различным академическим дисциплинам и поддержка множества форматов ответов, включая текстовые, графические материалы и программный код. Это делает платформу универсальным инструментом для проведения экзаменов в различных образовательных и профессиональных сферах, обеспечивая проверку и демонстрацию конкретных знаний и навыков.

Разработанная система служит универсальным решением для организации экзаменационного процесса, что способствует повышению качества образования и его соответствию современным требованиям и стандартам.

Литература

- Ходасевич, О. Р. Опыт использования облачных технологий в образовательном процессе по IT специальностям / О. Р. Ходасевич, О. П. Рябычина, С. Л. Ильющенко // Информационно-коммуникационные технологии : достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2024) : электрон. сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Полоцк, 29 марта 2024 г. / Полоцкий гос. ун-т им. Е. Полоцкой. – Новополоцк, 2024. – С. 309–313.
- Лазута, Л. С. Независимая система контроля знаний обучающихся / Л. С. Лазута, О. П. Рябычина // Информационные технологии : теория, опыт, проблемы, перспективы : матер. IX Респуб. науч.-практ. конф. студ., маг. и асп. ; И. В. Любанова (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2024. – С. 179–181.
- Лазута, Л. С. Интеллектуальная система автоматизированной оценки знаний / Л. С. Лазута, О. П. Рябычина // Современные средства связи : матер. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 31 окт. – 1 нояб. 2024 г.; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : Бел. гос. академия связи, 2024. – С. 16.

Получение и мониторинг метеоданных в реальном времени с использованием ESP-32

Е.И. СУКАЧ¹, А.П. КОНЧИЦ², Р.Ю. ГРОМЫКО¹

Предложен способ получения и передачи данных с микроконтроллера через Wi-Fi связь в облачную базу данных. Рассматривается получение данных с использованием различных датчиков. Разработаны и описаны аппаратная и программная части программно-аппаратного комплекса для сбора и мониторинга метеоданных.

Ключевые слова: микропроцессор ESP-32, получение метеоданных, Wi-Fi соединение, большие данные.

A method for receiving and transmitting data from a microcontroller via Wi-Fi communication to a cloud database is proposed. The data acquisition using various sensors is considered. The hardware and software parts of the hardware and software complex for collecting and monitoring meteorological data have been developed and described.

Keywords: ESP-32 microprocessor, receiving meteorological data, Wi-Fi connection, big data.

Введение. Использование микроконтроллеров ESP-32 открывает большие возможности для разработки умных систем сбора, систематизации и анализа больших данных в режиме реального времени [1]. Благодаря высокой производительности, встроенной поддержке Wi-Fi и Bluetooth, а также способности интегрировать множество сенсоров, ESP-32 стал основой для создания компактных и энергоэффективных программно-аппаратных комплексов в различных предметных областях. Платы, подобные ESP-32, демонстрируют высокую гибкость и простоту в работе благодаря поддержке двух ядер, встроенной беспроводной связи (Wi-Fi и Bluetooth), множеству доступных библиотек и примеров кода, а также разнообразию интерфейсов для подключения датчиков и периферийных устройств. Они подходят как для начинающих, так и для опытных разработчиков и могут использоваться в самых разнообразных проектах [2].

В статье рассматривается подход к автоматизации получения метеоданных с использованием ESP-32, который позволяет не только собирать данные о температуре, влажности, давлении и освещённости, но и передавать их в облачное хранилище для дальнейшей обработки. Реализация таких решений делает данные доступными в режиме реального времени, что особенно важно для аграрного сектора, метеорологических служб, а также умных городов и домов. Реализованный способ получения информации позволяет избежать ошибок при опросе датчиков, присоединённых к плате ESP-31, и осуществить контроль метеоданных в любой географической точке при наличии интернета. Он обладает универсальностью и может заменить метод получения больших объемов данных с удаленных серверов [3].

Программно-аппаратный комплекс «Метеостанция» на базе ESP-32. В рамках проекта «Метеостанция» плата ESP-32 использовалась как оборудование для сбора данных. Прежде всего плата была настроена физически, а именно, на микроконтроллер были установлены необходимые датчики и настроено соединение по Wi-Fi для возможности получения данных с платы и их хранения.

Датчик BMP280 от Bosch Sensortec использовался для измерения атмосферного давления и температуры. Он поддерживает интерфейсы I2C и SPI, что делает его удобным для интеграции с микроконтроллерами. BMP280 отличается высокой точностью и низким энергопотреблением, что делает его идеальным для метеостанций и навигационных систем.

Цифровой датчик температуры и влажности АНТ20 от AOSONG обеспечил высокую точность измерений температуры ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$) и влажности ($\pm 2\%$). Он также использует интерфейс I2C, имеет компактный размер и низкое энергопотребление, что делает его подходящим для мониторинга показателей окружающей среды.

Модуль GY-302 оснащён датчиком освещённости BH1750, который оценивает уровень освещённости в люксах. Он использует интерфейс I2C и подходит для проектов, связанных с управлением освещением и солнечными трекерами.

Модуль HW-125 представляет собой SD-картридер, который используется для записи данных на SD-карту. Он поддерживает интерфейс SPI и совместим с библиотеками FS.h и SD.h, что позволяет легко интегрировать его в проекты с ESP-32.

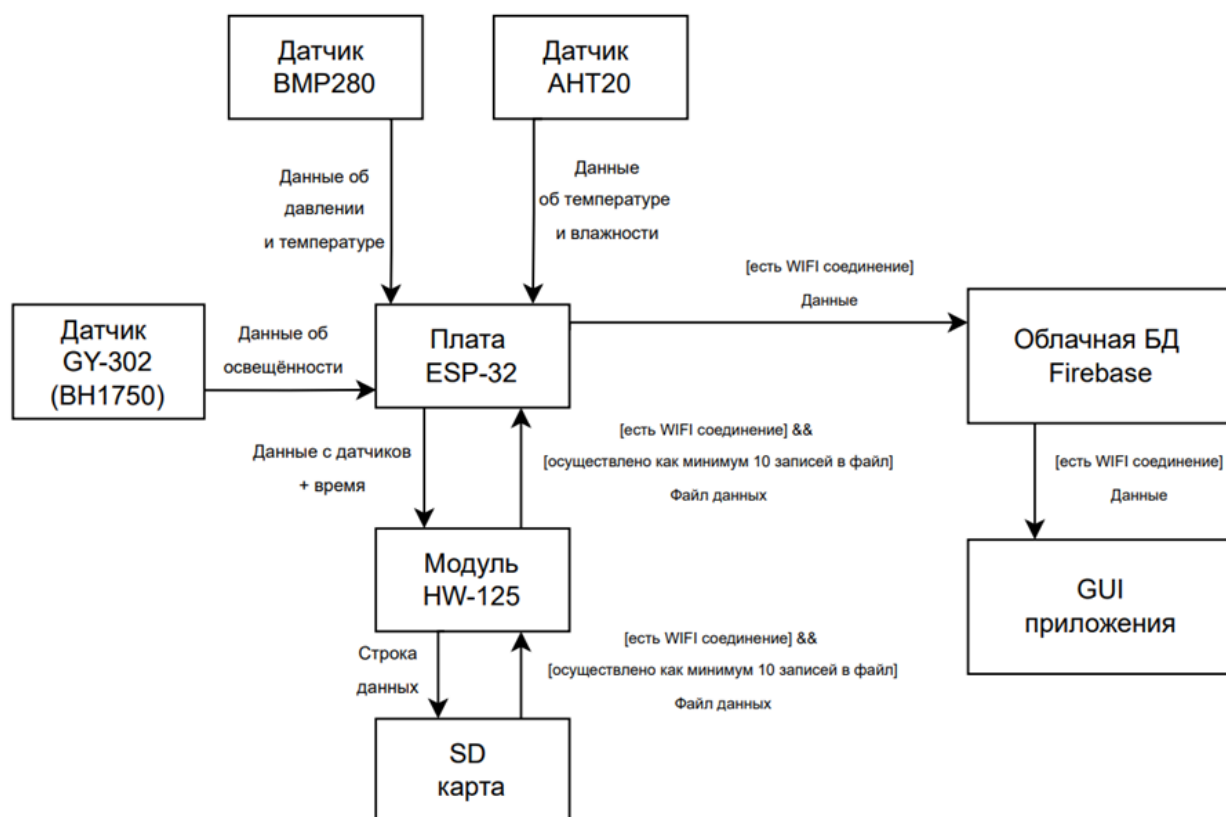


Рисунок 1—Структурная схема программно-аппаратного комплекса «Метеостанция»

Для хранения данных использовалась не реляционная база данных Firebase. Выбор облачной базы данных (БД) обеспечивает хранение данных в JSON формате, что гарантирует возможность масштабирования проекта при появлении новых датчиков различной конфигурации. Схема программно-аппаратного комплекса представлена на рисунке 1.

Для мониторинга метеоданных используется графический интерфейс рабочего приложения (GUI приложения), выбор которого определяется запросами пользователя. В зависимости от требований заказчика данные можно анализировать различными способами: от мобильных и десктопных приложений до Telegram-ботов и SMS сообщений на телефон. БД Firebase допускает использование различных языков программирования, что обеспечивает гибкость разработанной системы.

Схема работы скрипта для получения и передачи метеоданных в облачную БД. Для реализации функций автоматизации сбора метеоданных с помощью среды разработки Arduino был разработан скрипт. Он представляет собой интеграцию нескольких датчиков с микроконтроллером ESP-32, который обрабатывает данные, сохраняет их на SD-карту и отправляет в облачную базу данных Firebase. Схема работы скрипта реализуется следующим образом.

Инициализация компонентов и подключение к Wi-Fi. На этапе запуска скрипт считывает данные о Wi-Fi-сетях из файла на SD-карте (inet.txt). Если подключение к сети успешно, ESP-32 продолжает дальнейшую работу. В противном случае предпринимаются повторные попытки подключения.

Инициализация оборудования. Производится настройка подключенных датчиков, таких как BMP280 (температура и давление), АНТ20 (температура и влажность), BH1750 (освещённость), а также SD-карты для хранения данных. Дополнительно настраивается Firebase для отправки данных в облако.

Сбор и обработка данных. В главном цикле скрипт собирает показания с датчиков. Полученные значения температуры, давления, влажности и освещённости сохраняются в JSON-формате.

Сохранение данных на SD-карту. Собранные данные записываются в файл `sensor.json` на SD-карте. Это обеспечивает их сохранность даже при отсутствии подключения к интернету.

Отправка данных в Firebase. Если устройство подключено к интернету, данные отправляются в облако Firebase через API. После успешной отправки файл `sensor.json` удаляется с SD-карты, чтобы избежать дублирования.

Мониторинг состояния системы. Скрипт постоянно проверяет состояние Wi-Fi подключения и Firebase. В случае потери соединения предпринимаются попытки восстановления, что гарантирует стабильность работы системы.

Таким образом, этот скрипт реализует автоматизированное взаимодействие ESP-32 с облачной базой данных и локальным хранилищем, обеспечивая сбор и обработку данных для IoT-приложений.

Создание облачной базы данных. Для создания предметной базы данных была выбрана облачная база данных NoSQL Firebase. Соединение базы данных Firebase с микроконтроллером, таким как ESP-32, было реализовано через библиотеку Firebase для ESP 32 следующими последовательными этапами.

Настройка Firebase. В консоли Firebase был создан проект, в котором настроены параметры базы данных, такие как URL и правила безопасности. Получен API-ключ для доступа к базе данных.

Инициализация соединения Wi-Fi. Микроконтроллер был подключен к интернету через Wi-Fi с использованием SSID и пароля сети. В результате был получен доступ к облачной базе данных.

Настройка Firebase в коде. В код программы на ESP-32 была импортирована библиотека Firebase и инициализированы основные переменные: ключ API, URL базы данных и параметры авторизации. Эти настройки позволили связать устройство с проектом Firebase.

Отправка данных. Для взаимодействия с Firebase использовались функции библиотеки. Для этой цели могут быть использованы функции `Firebase.RTDB.setInt()` или `Firebase.RTDB.pushJSON()`. А использование функции `Firebase.RTDB.update()` обеспечивает перезапись существующего элемента в БД, что полезно в случае, когда не требуется хранение данных. В разработанном скрипте отправка всего файла происходит один раз в 10 итераций, поэтому используется `Firebase.RTDB.pushJSON()`.

Обработка ошибок. Код программы включает проверки подключения к Wi-Fi и доступности Firebase, чтобы обрабатывать возможные сбои соединения. Например, при потере доступа устройство может автоматически повторить попытку подключения.

Этот процесс позволяет микроконтроллеру ESP-32 интегрироваться с Firebase для хранения, обновления и извлечения данных в реальном времени, что является основой работы программно-аппаратного комплекса «Метеостанция» и множества других IoT приложений.

Визуализация и анализ данных. После правильной настройки датчиков и базы данных новые записи автоматически передаются с микроконтроллера в базу данных. Так как БД не реляционная, то данные хранятся в древовидной структуре формата JSON. При получении информации соответствующая запись добавляется в конец структуры. Firebase подсвечивает новые добавленные данные. Любую запись можно развернуть и посмотреть хранящуюся в ней информацию (рисунок 2).

Для организации мониторинга полученные данные визуализируются. Это можно сделать многими способами. В данном проекте это происходит через консольное приложение, реализованное на C#. Приложение подключается к облачному БД и для каждого типа данных строит свой график.

На рисунке 3 представлен график изменения данных освещенности во времени. С целью проведения тестирования работы датчика он несколько раз закрывался и один раз освещался. По данным на графике можно отследить, когда такие моменты происходили.



Рисунок 2 – Просмотр записи в базе данных

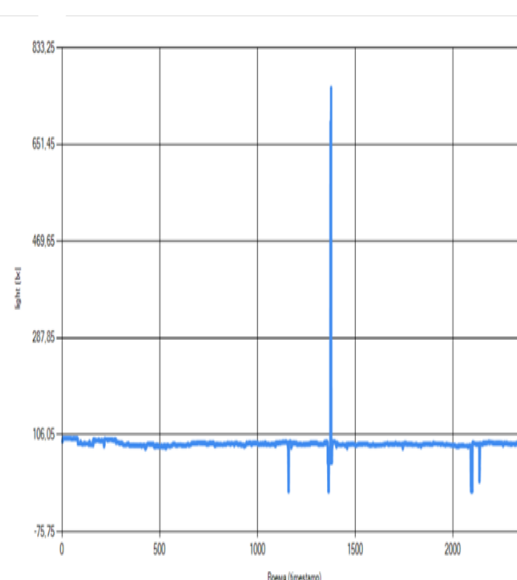


Рисунок 3 – Мониторинг данных освещенности

Каждый график хранится на отдельной вкладке на форме приложения (рисунок 4).



Рисунок 4 – Добавленные вкладки

Как нетрудно заметить, название для вкладки и оси Y приложение получает из данных БД. Ось X указывает время, но, так как плата ESP-32 не оснащена датчиком реального времени, берётся время с начала работы скрипта, а консольное приложение вместо миллисекунд использует порядковый номер. Также учтена возможность перезапуска платы и сброса времени, поэтому данные не будут перемешиваться.

Консольное приложение каждые пять секунд обновляет данные с сервера, но при этом фокус на вкладке приложение не меняется, что позволяет удобно изучить данные. При этом также стоит отметить, что консольное приложение динамическое и если ему предоставить ссылку на БД с другим типом данных, то он их успешно визуализирует.

Закключение. Благодаря разработанному программному обеспечению пользователь может в реальном времени получать и сохранять данные с датчиков в облачной базе данных, что полезно для мониторинга и принятия управленческих решений. Можно использовать как одну плату для просмотра состояния погоды в определённом месте, так и группу плат, которые будут покрывать значительную территорию.

Литература

1. Кэмерон, Н. Электронные проекты на основе ESP8266 и ESP32 / Н. Кэмерон. – М., 2022. – 456 с.
2. Громыко, Р. Ю. Об одном способе сбора, хранения, передачи и систематизации больших данных / Р. Ю. Громыко // Творчество Молодых – 2024 : сб. науч. работ студ. и асп. УО «ГГУ им. Ф. Скорины» / М-во обр-я РБ, Гомельский гос. ун-т ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, , 2024. – С. 170–173.
3. Сукач, Е. И. Об опыте получения, хранения и анализа Big Data с удаленных сайтов / Е. И. Сукач, В. Ю. Бурикин, А. А. Кончиц // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2022. – № 3 (132). – С. 93–96.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Институт леса НАН Беларуси

О пересечении подгрупп близких к $\mathfrak{F}$ -абнормальным

Р.В. БОРОДИЧ, Е.Н. БОРОДИЧ, А.В. БУЗЛАНОВ, И.В. БЛИЗНЕЦ

В работе исследовано строение подгруппы, равной пересечению ядер максимальных A -допустимых подгрупп, не содержащих $\mathfrak{F}$ -корадикал, с ограничениями на индексы. Установлены свойства соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини.

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

The structure of a subgroup equal to the intersection of the kernels of maximal A -admissible subgroups not containing $\mathfrak{F}$ -residual, with restrictions on indexes is studied. The properties of the corresponding generalized Frattini subgroup are established.

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

Введение. В данной статье все рассматриваемые группы предполагаются конечными. Одним из классических направлений в теории конечных групп является изучение свойств пересечений максимальных подгрупп и их влияния на подгрупповую и нормальную структуру группы. Ключевую роль в этих исследованиях играет подгруппа Фраттини, впервые введенная в работе [1].

Теорема Фраттини получила дальнейшее развитие в работах различных авторов. В частности, В. Гашюц [2] рассмотрел пересечение всех ненормальных максимальных подгрупп, а В. Дескинс [3] изучил пересечение максимальных подгрупп, индексы которых не делятся на заданное простое число. Другие важные результаты в этом направлении представлены в работах [4]–[6].

В 1960-х гг. развитие теории пересечений во многом было связано с достижениями в теории формаций. Использование её методов позволило систематизировать накопленные данные о максимальных подгруппах и получить новые значимые результаты. Важную роль сыграло введенное Р. Картером, Т. Хоуксом [7] и Л.А. Шеметковым [8] понятие $\mathfrak{F}$ -абнормальной максимальной подгруппы.

Настоящая работа развивает указанные направления в контексте групп с операторами, продолжая исследования, начатые в [9], [10].

2. Определения и обозначения. Подгруппа H группы G называется:

– пронормальной, если для любого $x \in G$ подгруппы H и H^x сопряжены между собой в $\langle H, H^x \rangle$;

– абнормальной, если $x \in \langle H, H^x \rangle$ для любого $x \in G$.

Напомним, что классом групп называют всякое множество групп, содержащее вместе с каждой своей группой G и все группы, изоморфные G .

Класс групп называют нормально наследственным (S_n -замкнутым), если вместе с каждой своей группой G он содержит все нормальные подгруппы группы G .

Класс групп $\mathfrak{F}$ называется формацией, если выполняются следующие условия:

1) если $G \in \mathfrak{F}$ и $N \triangleleft G$, то $G/N \in \mathfrak{F}$;

2) если $G/N_1 \in \mathfrak{F}$ и $G/N_2 \in \mathfrak{F}$, то $G/N_1 \cap N_2 \in \mathfrak{F}$.

Отображение f класса $\mathfrak{G}$ всех групп в множество классов групп называют экраном, если для любой группы G выполняются следующие условия:

- 1) $f(G)$ – формация;
- 2) $f(G) \subseteq f(G^\phi) \cap f(\text{Ker}\phi)$ для любого гомоморфизма ϕ группы G ;
- 3) $f(1) = \mathfrak{O}$.

Экран f называют локальным, если для любого простого числа p он принимает одинаковые значения на всех неединичных p -группах и $f(G) = \bigcap_{p \in \pi(G)} f(p)$ для любой группы G (значение f на любой неединичной p -группе обозначается $f(p)$).

Формацию $\mathfrak{F}$ называют локальной, если она имеет хотя бы один локальный экран.

Пусть $\mathfrak{F}$ – формация. Тогда через $G^\mathfrak{F}$ обозначается $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G – пересечение всех нормальных подгрупп N группы, для которых $G/N \in \mathfrak{F}$.

Максимальная подгруппа M группы G называется $\mathfrak{F}$ -нормальной ($\mathfrak{F}$ -абнормальной), если $G^\mathfrak{F}$ содержится (не содержится) в M .

Пусть $\mathfrak{X}$ произвольный непустой класс групп. Сопоставим со всякой группой $G \in \mathfrak{X}$ некоторую систему подгрупп $\tau(G)$. Согласно [11] будем говорить, что τ – подгрупповой $\mathfrak{X}$ -функтор (подгрупповой функтор на $\mathfrak{X}$), если для всякого эпиморфизма $\phi: A \rightarrow B$, где $A, B \in \mathfrak{X}$, выполнены включения $(\tau(A))^\phi \subseteq \tau(B)$, $(\tau(B))^{\phi^{-1}} \subseteq \tau(A)$, и, кроме того, для любой группы $G \in \mathfrak{X}$ имеет место $G \in \tau(G)$.

Если $\mathfrak{X} = \mathfrak{O}$ – класс всех групп, то подгрупповой $\mathfrak{X}$ -функтор называют просто подгрупповым функтором.

В дальнейшем функтор θ будем называть:

- 1) абнормально полным, если для любой группы G среди элементов множества $\theta(G)$ содержатся все абнормальные подгруппы группы G ;
- 2) абнормальным, если $\theta(G) \setminus \{G\}$ совпадает с множеством всех абнормальных подгрупп;
- 3) тривиальным, если функтор θ выделяет в группе G все её подгруппы.

Через M_G обозначают ядро подгруппы M в группе G (пересечение всех подгрупп из G , сопряженных с подгруппой M).

Учитывая, что максимальные подгруппы оказывают существенное влияние на строение конечных групп, рассмотрим максимальные подгруппы среди подгрупп, обладающих общим заданным свойством, и изучим их пересечения и влияние на нормальное строение группы.

Пусть даны группа G , множество A и отображение $f: A \rightarrow \text{Aut}(G)$, где $\text{Aut}(G)$ – группа автоморфизмов группы G . Подгруппа M называется A -допустимой, если M выдерживает действие всех операторов из A , то есть $M^\alpha \subseteq M$ для любого оператора $\alpha \in A$.

Поскольку операторы действуют на группу как автоморфизмы, то любая характеристическая подгруппа оказывается будет являться A -допустимой для произвольной группы операторов.

Отметим, что максимальная A -допустимая подгруппа M либо целиком содержит $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G , либо $MG^\mathfrak{F} = G$. Действительно. Так как произведение A -допустимых подгрупп A -допустимо и $G^\mathfrak{F}$ – характеристическая подгруппа, а, следовательно, A -допустимая, то $MG^\mathfrak{F} = M$ или $MG^\mathfrak{F} = G$.

В дальнейшем нам понадобятся следующие обозначения.

Пусть $\mathfrak{F}$ – формация. Обозначим через

$$\overline{\Phi}_\theta^\mathfrak{F}(G, A) = \bigcap \{M_G \mid M \not\subseteq G^\mathfrak{F}, M \notin \mathfrak{F}, M \in \theta(G), M \text{ – } A\text{-допустимая подгруппа}\};$$

$$\Phi_\theta^\mathfrak{F}(G, A) = \bigcap \{M_G \mid M \not\subseteq G^\mathfrak{F}, M \in \theta(G), M \text{ – } A\text{-допустимая подгруппа}\};$$

$$\Phi_{\theta_p}^\mathfrak{F}(G, A) = \bigcap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \text{ – } A\text{-допустимая подгруппа}, |G:M| \text{ не делится на простое число } p\};$$

$\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \cap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \not\supseteq G^{\mathfrak{F}}, M - A\text{-допустимая подгруппа, } |G : M| \text{ не делится на простое число } p\}$;

$\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \cap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \not\supseteq G^{\mathfrak{F}}, M \notin \mathfrak{F}, M - A\text{-допустимая подгруппа, } |G : M| \text{ не делится на простое число } p\}$;

Если в группе отсутствуют подгруппы с требуемыми свойствами, соответствующие пересечения по определению полагаются равными всей группе.

Важно подчеркнуть, что между обычными и операторно-допустимыми подгруппами существуют принципиальные различия: не всякая максимальная подгруппа является максимальной A -допустимой, и обратно, максимальная A -допустимая подгруппа не обязательно будет максимальной в обычном смысле [9].

3. Вспомогательные результаты.

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

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

Доказательство. Если $N \subseteq \Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то $N \subseteq M$, где M – любая максимальная A -допустимая θ -подгруппа из G , не содержащая $G^{\mathfrak{F}}$, с индексом, не делящимся на простое число p . Тогда

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

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

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

и утверждение леммы верно.

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

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

Доказательство. Если $N \subseteq \overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то $N \subseteq M$, где M – любая абнормальная максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не принадлежащая $\mathfrak{F}$ и не содержащая $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G , с индексом, не делящимся на простое число p . Тогда

$$\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G/N, A) = \cap (M/N)_{G/N}, (1),$$

где M/N пробегает множество всех абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп из G/N , не принадлежащих $\mathfrak{F}$ и не содержащих $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G/N .

Продолжим равенство (1):

$$\cap (M/N)_{G/N} = (\cap M_G) / N = \overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / N (2).$$

Из равенств (1) и (2) вытекает справедливость утверждения. Лемма доказана.

Теорема 3.3 [10]. Пусть θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\mathfrak{F}$ – ступенчатая формация. Тогда

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

Теорема 3.4 [10]. Пусть $\mathfrak{F}$ – S_n -замкнутая локальная формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда $\Phi_{\theta}^{\mathfrak{F}}(G, A) = A \times B$, где $A \in \mathfrak{F}$, $B \subseteq \Phi_{\theta}(G, A)$, $\pi(B) \cap \pi(\mathfrak{F}) = \emptyset$.

Теорема 3.5 [9]. Пусть θ – абнормально полный подгрупповой функтор и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда

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

4. Основной результат.

Теорема 4.1. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, тогда

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

Доказательство. Пусть $O_p(G) \neq 1$. По теореме 3.5

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

Тогда теорема для факторгруппы $G / O_p(G)$ верна по индукции. Следовательно,

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

Так как $O_p(G / O_p(G)) = 1$ и на основании леммы 3.1

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

то

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

Пусть теперь $O_p(G) = 1$. Тогда по теореме 3.5 $\Phi_{\theta_p}(G, A) / O_p(G) = \Phi_{\theta}(G / O_p(G), A)$.

Значит,

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

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

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

Так как

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

то

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

Поэтому имеет место следующий изоморфизм:

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

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

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

С другой стороны, на основании теоремы 3.3

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

Значит,

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

Следовательно,

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

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

Из теоремы 4.1 с помощью теоремы 3.4 получаем следующее

Следствие 4.1.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $\mathfrak{F}$ – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, тогда $\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

Если θ – абнормальный подгрупповой функтор, то получаем

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

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

В частности, если $\mathfrak{F}$ – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, то $\Phi_{\Delta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

Если θ – тривиальный подгрупповой функтор, то получаем

Следствие 4.1.3. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, тогда

$$\Phi_p^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) = \Phi^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G), A).$$

В частности, если $\mathfrak{F}$ – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, то $\Phi_p^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

Если группа операторов тривиальна, то из теоремы 4.1 получаем

Следствие 4.1.4. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, тогда

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

Следствие 4.1.5. Пусть $\mathfrak{F}$ – локальная, нормально наследственная формация, содержащая все нильпотентные группы, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и подгруппа $\Phi_{\theta_p}(G)$, тогда $\Phi_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

Теорема 4.2. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, и $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$, тогда

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

Доказательство. Вначале покажем, что

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

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

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

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

Пусть $O_p(G) \neq 1$. Тогда по теореме 3.5

$$\Phi_{\theta_p}(G, A) / O_p(G) = \Phi_{\theta}(G / O_p(G), A),$$

откуда получаем справедливость теоремы для группы $G / O_p(G)$ по индукции. Следовательно,

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

Так как $O_p(G / O_p(G)) = 1$ и по лемме 3.2

$$\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G), A) = \overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G),$$

то

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

Пусть теперь $O_p(G) = 1$. Тогда

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

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

$$\Phi_{\theta}(G, A) \subseteq N \subseteq K \subseteq \overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A).$$

Так как

$$K \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\theta}(G, A),$$

то

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

Поэтому имеет место следующий изоморфизм:

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

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

Поэтому

$$\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi_{\theta}(G, A) \subseteq Z_{\infty}^{\mathfrak{F}}(G / \Phi_{\theta}(G, A)).$$

С другой стороны, на основании теоремы 3.3

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

Значит,

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

Следовательно,

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

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

Следствие 4.2.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $\mathfrak{F}$ – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, и $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$, тогда

$$\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}.$$

Если группа операторов тривиальна, то из теоремы 4.2 получаем

Следствие 4.2.2. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G) \neq G$. Тогда

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

Следствие 4.1.3. Пусть θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Если $\mathfrak{F}$ – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, то $\overline{\Phi}_{\theta_p}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

Литература

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

Нейро-нечеткая модель динамической вязкости водных суспензий на основе наноразмерных частиц диоксида кремния

Ю.В. БРУТТАН¹, В.Е. ГАЙШУН², Я.А. КОСЕНОК², Л.Н. МАРЧЕНКО^{1,2}

Статья посвящена построению нейро-нечеткой модели ANFIS для прогнозирования динамической вязкости от независимых входных параметров: концентрации диоксида кремния, кислотности, а также скорости сдвига. Фаззификация входных параметров осуществлялась с помощью гауссовских функций принадлежности. На основе подхода Сугено рассматривалось 36 правил if-then с линейной функцией вывода. Для обучения сети использовался гибридный метод обучения, включающий комбинацию методов градиентного спуска и наименьших квадратов. Эффективность построенной модели оценивалась на основе средней квадратической ошибки RMSE. Предложенная нейро-нечеткая модель ANFIS показала лучшую точность в сравнении с предложенными в литературе моделями искусственного интеллекта.

Ключевые слова: наножидкость, концентрация SiO₂, кислотность pH, динамическая вязкость, регрессия, нейро-нечеткая модель.

The article is devoted to the construction of a neuro-fuzzy model ANFIS for predicting dynamic viscosity from independent input parameters: silicon dioxide concentration, acidity, and shear rate. Fuzzification of the input parameters was carried out using Gaussian membership functions. Based on Sugeno inference, 36 if-then rules with a linear output function were considered. A hybrid learning method was used to train the network, including a combination of gradient descent and least squares methods. The efficiency of the constructed model was estimated based on the root mean square error RMSE. The proposed neuro-fuzzy model ANFIS showed better accuracy in comparison with the artificial neural network models proposed in the literature.

Keywords: nanofluid, SiO₂ concentration, pH acidity, dynamic viscosity, regression, neuro-fuzzy model.

Введение. Наножидкости – это относительно новые материалы, которые находят широкое применение для улучшения термодинамических характеристик систем солнечной энергии, машин, работающих на электричестве, и в других производственных процессах [1]. Поведение наножидкости всегда связано с фильтрацией, поэтому важнейшим параметром высококонцентрированных суспензий с наночастицами является вязкость, которая представляет собой способность сопротивляться потоку и определяет реологические свойства наножидкости [2]. За последние годы проведены исследования вязкости наножидкостей [3], [4], рассмотрены эффекты независимых переменных, таких как температура, форма, диаметр и объемная доля частиц, кислотность и другие [5]. Для оценки зависимости вязкости наножидкости от различных показателей используются теоретические и эмпирические модели, которые базируются на упрощенных предположениях [3]–[5]. В последнее время для моделирования поведения вязкости жидкостей, в том числе и наножидкостей, получили широкое распространение модели искусственного интеллекта, которые позволяют моделировать вязкость даже с зашумленными и неполными данными. Обзор и анализ моделей и методов для прогнозирования реологического поведения жидкости, в том числе и наножидкостей, проводится в [6], [7]. Отмечено, что большинство этих исследований используют искусственные нейронные сети, алгоритмы машинного обучения, сравнивают полученные результаты с результатами теоретических моделей и эмпирических корреляций, при этом интеллектуальные модели имеют более высокую точность. Также для прогнозирования вязкости и других реологических свойств используются гибридные модели, основанные на использовании алгоритмов нечеткой логики и искусственных нейронных сетей [8], [9], [10], [11], [12]. Использование таких гибридных моделей учитывает нелинейные зависимости (вязкость может резко меняться при малых изменениях температуры) и может обучаться на экспериментальных данных без строгой физической модели.

Представленные модели могут быть адаптированы к аналогичному поведению различных наножидкостей [13], однако общая модель поведения вязкости с учетом особенностей протекания фильтрации конкретной наножидкости окончательно не определена.

Предметом настоящего исследования является построение нейро-нечеткой модели ANFIS для прогнозирования высококонцентрированных суспензий диоксида кремния. Данные суспен-

зии являются кинетически неустойчивыми системами, что приводит к снижению производительности и ухудшению качества наноматериалов. Для повышения стабильности высококонцентрированных суспензий в композицию вводили специальные стабилизирующие добавки и поверхностно-активные вещества, концентрацией которых можно изменять лиотропные свойства суспензии и тем самым препятствовать образованию структур. Поэтому весьма важно изучение поведения динамической вязкости таких наножидкостей и выявление более точных зависимостей динамической вязкости от входных параметров на основе нечеткого подхода.

Основная часть. Для изготовления водных суспензий на основе диоксида кремния применялись следующие химические вещества: наноразмерный порошок диоксида кремния SiO_2 с удельной поверхностью $50 \text{ м}^2/\text{г}$, ОХ-50 (Evonik); этилендиамин (ЭДА); гидроксид натрия (NaOH); ортофосфорная кислота (H_3PO_4); поверхностно-активные вещества (ПАВ); этиленгликоль; вода дистиллированная. Получение концентрированных суспензий предусматривало гомогенное распределение порошка диоксида кремния SiO_2 в жидкости. Для контроля величины pH водных композиций использовался лабораторный микропроцессорный ионметр типа И-160. Динамическую вязкость изучали с помощью ротационного вискозиметра «REOTEST 2.1» с использованием термостатированной цилиндрической измерительной системы (зазор 0,4 мм, объем 10 мл) в диапазоне скоростей сдвига от 3 до $1312,2 \text{ с}^{-1}$. Измерения проводили при температуре 20°C , точность поддержания температуры не менее $0,1^\circ\text{C}$. Погрешность измерений реологических характеристик составляет менее 3 %.

В результате изучения реологического поведения водных суспензий на основе наноразмерных частиц диоксида кремния [14], [15], [16], [17] показано, что динамическая вязкость η ($\text{мПа} \cdot \text{с}$) данной суспензии изменяется при варьировании концентрации диоксида кремния SiO_2 (%), кислотности pH и изменении рабочих условий, то есть скорости сдвига γ (с^{-1}), которые и рассматривались в качестве входных параметров. Концентрация диоксида кремния SiO_2 регулирует стабильность суспензии, интервал вариации ее экспериментальных значений составил 16 %–47 %. Кислотность pH способствует растворению диоксида кремния SiO_2 , тем самым воздействует на реологические свойства суспензий. Измерения проводились на 12 скоростях сдвига γ : 3; 5,4; 9; 16,2; 27; 48,6; 81; 145,8; 243; 437,4; 729; 1312 с^{-1} . На основе варьирования входных параметров концентраций суспензии при различных скоростях сдвига γ была сформирована база собственных экспериментальных данных из 177 наблюдений.

Нейро-нечеткая система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) – это гибридная система, сочетающая нейронные сети и нечеткую логику, которая широко применяется для моделирования сложных систем и прогнозирования. ANFIS используется для обнаружения сложных и нелинейных отношений [18] между входными и выходными параметрами [19]. Оптимизация и обучение функций принадлежности выполняется согласно алгоритмам построения искусственных нейронных сетей. На рисунке 1 представлена структура нейро-нечеткой системы вывода ANFIS, которая состоит из пяти слоев [20].

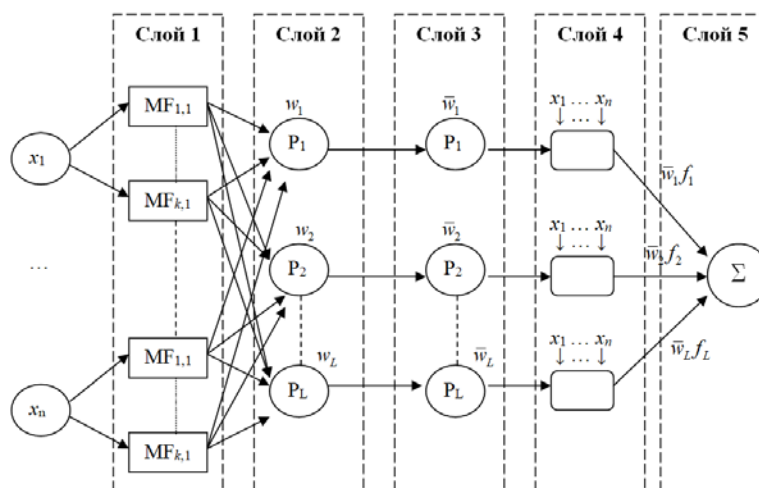


Рисунок 1 – Структура нейро-нечеткой системы вывода

Слой 1 (адаптивный) – фаззификация, то есть определение нечетких лингвистических переменных для четких входных параметров $x_1, \dots, x_n$. Выходами слоя являются значения функций принадлежности μ_{ij} , $i = 1, \dots, k$, $j = 1, \dots, n$. Различные функции принадлежности (MF) в этом слое производят оценки принадлежности из входных переменных.

Слой 2 (неадаптивный) – импликация, то есть определение нечетких правил if-then. Каждый фиксированный узел в слое устанавливает правила и номер системы нечеткого вывода. Выходами нейронов этого слоя являются веса w_q , $q = 1, \dots, L$, истинности посылок каждого правила базы знаний системы.

Слой 3 (неадаптивный) – нормализация, то есть происходит нормализация весов активации правил. Неадаптивные узлы этого слоя определяются как $\bar{w}_q = \frac{w_q}{\sum_{q=1}^n w_q}$, $q = 1, \dots, L$.

Слой 4 (адаптивный) – дефаззификация. В этом слое реализуется модель нечеткого логического вывода, вычисляются значения $\bar{w}_q f_q$ заключений по каждому правилу, где f_q – функции от входных параметров.

Слой 5 (неадаптивный) – выход, на котором вычисляется окончательное значение путем суммирования результатов предыдущего слоя $Y = \sum_{q=1}^L \bar{w}_q f_q + \bar{w}_0$.

В процессе обучения происходит настройка параметров предпосылок и параметров правил вывода.

Для прогнозирования динамической вязкости η (выход Y) в зависимости от концентрации диоксида кремния SiO_2 (входной параметр $X1$), кислотности pH (входной параметр $X2$), скорости сдвига γ (входной параметр $X3$) разработана нейро-нечеткая система вывода. Лингвистические переменные входных параметров определялись следующим образом:

– концентрация диоксида кремния SiO_2 :

$X1 = \{ L - \text{низкая}, M - \text{средняя}, H - \text{высокая} \};$

– кислотность pH:

$X2 = \{ L - \text{кислая}, M - \text{нейтральная}, H - \text{щелочная} \};$

– скорость сдвига γ :

$X3 = \{ L - \text{низкая}, M - \text{средняя}, H - \text{высокая}; VH - \text{очень высокая} \};$

– динамическая вязкости η :

$Y = \{ L - \text{низкая}, M - \text{средняя}, H - \text{высокая} \}.$

На слое фаззификации четкие входные параметры преобразовывались в нечеткие с ис-

пользованием соответствующих гауссовских функций принадлежности типа $f(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{o}\right)^2}$, где x – значение, переданное входным слоем, c – центр параметра, подаваемого в функцию, а σ – параметр дисперсии. Гауссовские функции выбраны из-за их гладкости и способности аппроксимировать нелинейные зависимости.

При моделировании рассматривалось 36 правил Сугено if-then с линейными функциями вывода

If $X1$ is A and $X2$ is B and $X3$ is C then Y is out $a_0 + a_1X1 + a_2X2 + a_3X3$,

где a_0, a_1, a_2, a_3 – определяемые коэффициенты.

Для обучения сети использовался гибридный метод обучения – комбинация метода градиентного спуска и метода наименьших квадратов [21]. На первом этапе параметры предпосылок фиксированы и настраиваются параметры заключений методом наименьших квадратов. На втором этапе фиксируются параметры заключений и уточняются параметры предпосылок методом градиентного спуска. Параметры алгоритма: количество итераций – 50, допустимая ошибка обучения – 0. Сходимость наблюдалась уже после 35 итераций.

Для обучения модели данные были разделены на обучающую (142 наблюдения) и тестовую (35 наблюдений) выборки методом случайной выборки с сохранением распределения по pH. Для исключения переобучения использовано 5-кратное перекрестное проверочное тестирование. Архитектура ANFIS подбиралась путем минимизации $RMSE$ на валидационном подмножестве (20 % от обучающих данных). Количество правил обеспечило баланс между точностью и сложностью модели.

Входные (концентрация диоксида кремния SiO_2 , кислотность pH, скорость сдвига γ) и выходные параметры (динамическая вязкость η) предварительно были нормализованы. Для скорости сдвига γ и динамической вязкости η использовалась логарифмическая нормализация [22] по формуле:

$$y_i = \frac{\ln(x_i) - \ln(x_{\min})}{\ln(x_{\max}) - \ln(x_{\min})},$$

для остальных входных параметров – линейная нормализация:

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где y_i , x_i , $x_{\min}$, $x_{\max}$, – нормализованные и экспериментальные значения, минимальное и максимальное значения соответственно.

Проверка адекватности модели ANFIS проводилась с использованием как статистической метрики $RMSE$:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}$$

где η_i – эмпирические значения динамической вязкости, $\hat{\eta}_i$ – оценочные (предсказанные) значения динамической вязкости, n – число наблюдений.

В работе [23] для прогнозирования динамической вязкости от независимых входных параметров (концентрации диоксида кремния, кислотности, а также скорости сдвига) построены модели линейной регрессии, многослойного персептрона (MLP) радиальной базисной функции (RBF), случайного леса (RF), метода машин опорных векторов (SVM). Значения статистической метрики $RMSE$ (обучающая выборка) для построенных моделей в [23] и модели ANFIS представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение моделей искусственного интеллекта предсказания динамической вязкости

Модель	Статистическая метрика $RMSE$
Модель линейной регрессии	0,663
MLP 3-10-1	0,130
MLP 3-7-1	0,148
RBF 3-11-1	0,114
RF	0,084
SVM	0,253
ANFIS	0,011

В литературе приводятся различные исследования для создания прогнозной модели вязкости наножидкости с использованием моделей и методов искусственного интеллекта. В работе [24] использовалась модель MLP для моделирования вязкости различных наножидкостей, в том числе и диоксида кремния SiO_2 , точность моделирования составила $RMSE = 0,1$. Модель $LS-SVM$ использовалась для прогнозирования вязкости наножидкостей с наночастицами четырех типов, включая SiO_2 , точность $RMSE = 37,084$ [25]. В данном исследовании точность $RMSE$ моделирования на основе ANFIS имеет меньшую ошибку, чем результаты анализа ошибок $RMSE$ в других исследованиях прогнозирования динамической вязкости водных суспензий на основе наноразмерных частиц диоксида кремния SiO_2 .

Нейро-нечеткая модель ANFIS динамической вязкости (Y) высококонцентрированных суспензий от концентрации диоксида кремния (X_1), кислотности (X_2) и скорости сдвига (X_3) по нормированным данным создает гладкую поверхность, которая показывает высокую точность моделирования (рисунок 2).

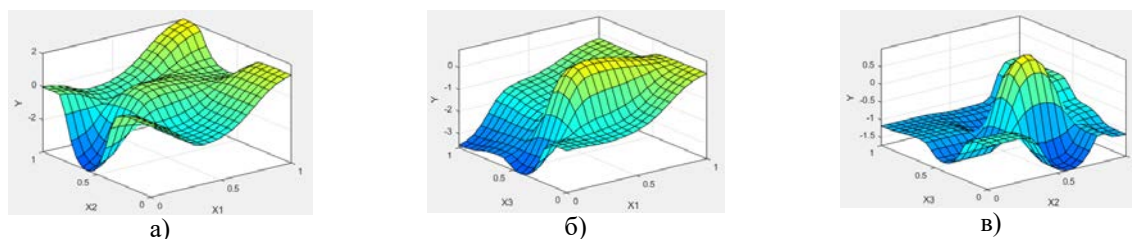


Рисунок 2 – Трехмерный сетчатый график разработанной нейро-нечеткой модели ANFIS зависимости динамической вязкости (Y) от: а) концентрации диоксида кремния ($X1$) и кислотности ($X2$); б) концентрации диоксида кремния ($X1$) и скорости сдвига ($X3$), в) кислотности ($X2$) и скорости сдвига ($X3$)

Максимальная вязкость наблюдается при высоких концентрациях SiO_2 (40–47 %) и низких скоростях сдвига ($<10 \text{ c}^{-1}$), что согласуется с литературой [15], [17].

Нечетко-нейронная модель ANFIS обладает высокой точностью при прогнозировании динамической вязкости водных суспензий на основе наноразмерных частиц диоксида кремния в зависимости от входных параметров и не противоречит аналогичным исследованиям. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых водных суспензий диоксида кремния, которые находят практическое применение при изготовлении новых наноматериалов.

Заключение. Данное исследование предлагает новый подход к прогнозированию динамической вязкости высококонцентрированной водной суспензии на основе наноразмерных частиц диоксида кремния при различных составах и рабочих условиях. Использование гибридной модели ANFIS, которая сочетает преимущества нечеткой логики и искусственных нейронных сетей, для прогнозирования динамической вязкости позволяет эффективно работать с нелинейными зависимостями и обучаться на экспериментальных данных без необходимости строгой физической модели. Для преобразования четких входных данных в нечеткие использовались гауссовские функции принадлежности, которые обеспечивает гибкость модели. Было рассмотрено 36 правил if-then с линейной функцией вывода, что позволило охватить широкий спектр возможных комбинаций входных параметров. Для обучения сети применен гибридный метод, сочетающий градиентный спуск и метод наименьших квадратов, обеспечивающий высокую точность настройки параметров модели. Полученные результаты сравнимы с данными из литературы, где точность моделей для наножидкостей на основе SiO_2 также оценивалась с использованием различных методов машинного обучения, и предложенная модель ANFIS демонстрирует лучшие показатели точности. Результаты работы могут быть применены для разработки новых композиционных материалов на основе наночастиц SiO_2 , что важно для современной промышленности.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Научно-образовательный математический центр “Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской”» (соглашение № 075-02-2025-1607 от 27 февраля 2025 г).

Литература

1. Bahiraei, M. Artificial intelligence in the field of nanofluids : a review on applications and potential future directions / M. Bahiraei, S. Heshmatian, H. Moayedi // Powder Technol. – 2019. – Vol. 353. – P. 276–301.
2. Chen, H. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids / H. Chen, Y. Ding, Y. He, C. Tan // Chemical Physics Letters. – 2007. – Vol. 444, № 4-6. – P. 333–337.
3. Ahmadi, M. H. Precise smart model for estimating dynamic viscosity of SiO_2 /ethylene glycol-water nanofluid / M. H. Ahmadi, M. Sadeghzadeh, H. Maddah [et al.] // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – Vol. 13., № 1. – P. 1095–1105.
4. Rudyak, V. Y. On the dependence of the viscosity coefficient of nanofluids on particle size and temperature / V. Y. Rudyak, S. Dimov, V. Kuznetsov // Tech. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 39. – P. 779–782.
5. Baghban, A. Developing an ANFISbased swarm concept model for estimating the relative viscosity of nanofluids / A. Baghban, A. Jalali, M. Shafiee [et al.] // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – Vol. 13. – P. 26–39.
6. Hemmati-Sarapardeh, A. On the evaluation of the viscosity of nanofluid systems: Modeling and data assessment / A. Hemmati-Sarapardeh, A. Varamesh, M. M. Husein, K. Karan // Renewable and Sustainable Energy Re-viws. – 2018. – Vol. 81. – P. 313–329.

7. Гаджимагомедова, З. М. Технологии искусственного интеллекта для наноструктурных материалов / З. М. Гаджимагомедова // Российские нанотехнологии [и др.]. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 3–13.
8. Beigzadeh, R. An intelligent approach to predict the viscosity of water/glycerin containing Cu Nanoparticles : Neuro fuzzy inference system (ANFIS) / R. Beigzadeh // Model Journal of Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – № 55 (1). – P. 163–175.
9. Gong, Han. Proposing an adaptive neuro-fuzzy system-based swarm concept method for predicting the physical properties of nanofluids / Han Gong, Amir Seraj // International Journal of Chemical Engineering. – 2022. – № 3. – 11 p.
10. Ibrahim, M. Alarifi. Feasibility of ANFIS-PSO and ANFIS-GA Models in Predicting Thermophysical Properties of Al₂O₃-MWCNT/Oil Hybrid / Ibrahim M. Alarifi [et al.] // Materials (Basel) – 2019. – № 12 (21). – P. 28.
11. Bandar, M. Fadhla. Dynamic viscosity modeling of nanofluids with MgO nanoparticles by utilizing intelligent methods / Bandar M. Fadhla [et al.] // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – P. 5397–5403.
12. Yazeed, AbuShanab. Accurate prediction of dynamic viscosity of polyalpha-olefin boron nitride nanofluids using machine learning / Yazeed AbuShanab [et al.] // Heliyon Research Article. – 2023. – Vol. 9, is. 6. – e 16716.
13. Bahiuddin I. Review of modeling schemes and machine learning algorithms for fluid rheological behavior analysis / I. Bahiuddin, S. A. Mazlan [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2024 – Vol. 33, № 1. – 21 p.
14. Косенок, Я. А. Реологические свойства композиционных суспензий на основе силикатного золя и наноразмерных частиц диоксида кремния для применения в электронике / Я. А. Косенок [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2014. – Т. 12, № 2. – С. 269–277.
15. Рудяк, В. Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей / В. Я. Рудяк // Журнал Вестник НГУ. – 2015. – Т. 10, № 1. – С. 5–22.
16. Косенок, Я. А. Концентрированные композиции на основе наноразмерных частиц диоксида кремния, полученные по ионообменной технологии / Я. А. Косенок [и др.] // Вестник Гомельского гос. технич. ун-та им. П.О. Сухого. – 2022. – № 3 (90). – С. 55–61.
17. Prasad T. R. Вязкость и теплопроводность наножидкостей кобальта и диоксида кремния в оптимальной смеси глицерина и воды / T. R. Prasad [et al.] // Коллоидный журнал. – 2022. – Т. 84, № 2. – С. 213–227.
18. D. Karaboga. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches : a comprehensive survey / D. Karaboga, E. Kaya // Artif. Intell. Rev. – 2019. – № 52. – P. 2263–2293.
19. Samui, P. Spatial variability of rock depth using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and multivariate adaptive regression spline (MARS) / P. Samui, D. Kim // Env. Earth Sc. – 2014. – № 73 – P. 4265–4272.
20. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
21. Jang, J.-S.R. ANFIS : Adaptive-network-based fuzzy inference system / J.-S. R. Jang // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1993. – № 23 (3). – P. 665–685.
22. Bahiuddin, I. Comparing the linear and logarithm normalized extreme learning machine in flow curve modeling of magnetorheological fluid / I. Bahiuddin [et al.] // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – № 13. – P. 1065–1072.
23. Марченко, Л. Н. Моделирование реологических характеристик водных суспензий на основе наноразмерных частиц диоксида кремния / Л. Н. Марченко, Я. А. Косенок, В. Е. Гайшун, Ю. В. Бруттан // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 5. – С. 1217–1253.
24. Hemmati-Sarapardeh, A. On the evaluation of the viscosity of nanofluid systems : Modeling and data assessment / A. Hemmati-Sarapardeh [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 81. – P. 313–329.
25. Mehrabi, M. Viscosity of nanofluids based on an artificial intelligence model / M. Mehrabi, M. Sharifpur, J. P. Meyer // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 43. – P. 16–21.

¹Псковский государственный университет

²Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

О конечных группах, факторизуемых слабо перестановочными подгруппами

С.И. ЛЕНДЕНКОВА

Подгруппы A и B конечной группы G будем называть слабо перестановочными (слабо взаимно перестановочными), если $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 – субнормальные в G подгруппы, а подгруппы A_2 и B_2 перестановочны (взаимно перестановочны). В настоящей работе показано, что многие известные результаты, связанные с конечными группами, факторизуемые взаимно перестановочными подгруппами, и их обобщениями, можно перенести на конечные группы, факторизуемые слабо взаимно перестановочными подгруппами. В частности, конечная группа $G = AB$ разрешима, если A и B – разрешимые слабо взаимно перестановочные подгруппы. Также устанавливается разрешимость группы $G = AB$ при условии, что подгруппы A и B разрешимы и каждая картерова подгруппа из A слабо перестановочна с каждой картеровой подгруппой из B .

Ключевые слова: конечная группа, перестановочная подгруппа, слабо перестановочные подгруппы, разрешимая группа.

Subgroups A and B of a finite group G are said to be weakly permutable (weakly mutually permutable), if $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ and $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, where A_1, B_1 are subnormal subgroups of G and A_2 and B_2 are permutable (mutually permutable) subgroups. In this paper, we show that many known results related to finite factorized groups with mutually permutable factors and their generalizations can be transferred to finite groups factorized by weakly permutable subgroups. In particular, a finite group $G = AB$ is solvable if A and B are solvable weakly permutable subgroups. We also prove that a group $G = AB$ is solvable if A and B are solvable subgroups and each Carter subgroup of A weakly permutes with each Carter subgroup of B .

Keywords: finite group, permutable subgroups, weakly permutable subgroups, solvable group.

Введение. В работе рассматриваются только конечные группы. Все обозначения и терминология соответствуют [1].

Пусть A и B – подгруппы группы G . Если $G = AB$, то говорят, что группа G факторизуется подгруппами A и B . В этом случае также говорят, что группа G является произведением своих подгрупп A и B , а подгруппы A и B называются сомножителями (факторами). Ясно, что строение факторизуемой группы зависит как от строения самих сомножителей и их взаимного расположения, так и способов вложения сомножителей в группу.

Будем говорить, что подгруппы A и B группы G *перестановочны*, если $AB = BA$. В [2] предложены следующие понятия.

Определение 1. Подгруппы A и B группы G называются *взаимно перестановочными*, если A перестановочна со всеми подгруппами из B и B перестановочна со всеми подгруппами из A .

Определение 2. Подгруппы A и B группы G называются *тотально перестановочными*, если каждая подгруппа из A перестановочна с каждой подгруппой из B .

М. Асаад и А. Шаалан в [3] получили глубокие результаты о строении групп, факторизуемых взаимно перестановочными (тотально перестановочными) подгруппами. Ключевые результаты этой тематики отражены в монографии А. Баллестера-Болинше, Р. Эстабана-Ромеро и М. Асаада [4].

В работе Ц. Хуана, Б. Ху и А.Н. Скибы [5] введено новое понятие слабо субнормальной подгруппы, связанное с порождением двух подгрупп, одна из которых субнормальна, а вторая обладает определенными свойствами.

Используя данную концепцию введем следующее

Определение 3. Подгруппы A и B группы G будем называть *слабо взаимно перестановочными* (*слабо тотально перестановочными*), если $A = \langle A_1, A_2 \rangle$, $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 – субнормальные в G подгруппы, а подгруппы A_2, B_2 взаимно перестановочны (тотально перестановочны соответственно). Здесь и далее запись $H = \langle H_1, H_2 \rangle$ означает, что подгруппа H порождается своими подгруппами H_1 и H_2 .

Основные результаты, связанные с группами, факторизуемые взаимно перестановочными подгруппами и их обобщениями, можно перенести на группы, факторизуемые слабо взаимно перестановочными подгруппами. В частности, группа $G = AB$ разрешима, если A и B – разрешимые слабо взаимно перестановочные подгруппы. Также устанавливается разрешимость группы $G = AB$ при условии, что подгруппы A и B разрешимы и каждая картерова подгруппа из A слабо перестановочна с каждой картеровой подгруппой из B .

Вспомогательные результаты. Через $\pi(G)$ обозначается множество всех простых чисел, делящих порядок группы G , а наибольшая нормальная π -подгруппа группы G – через $O_\pi(G)$ для $\pi \subseteq \pi(G)$, в частности, если $\pi = \{p\}$, то $O_p(G)$ – наибольшая нормальная p -подгруппа группы G . Напомним, что $A^G = \langle A^g | g \in G \rangle$ – наименьшая нормальная подгруппа группы G , содержащая A . Запись $X \leq Y, X < Y, X \triangleleft Y, X \triangleleft\triangleleft Y$ означает, что X – подгруппа в группе Y , собственная подгруппа, нормальная подгруппа, субнормальная подгруппа соответственно; $|X:Y|$ – индекс подгруппы Y в группе X . Группа G метанильпотентна (мета- p -нильпотентна), если существует нильпотентная (p -нильпотентная) нормальная подгруппа фактор-группа по которой нильпотентна (соответственно p -нильпотентна).

Лемма 1 ([1], [6]). Пусть $K \triangleleft\triangleleft G, r \in \pi(G)$. Тогда

- (1) если K r -разрешима, то K^G r -разрешима;
- (2) если K разрешима, то K^G разрешима;
- (3) если K нильпотентна, то K^G нильпотентна;
- (4) если K сверхразрешима, то K^G метанильпотентна, в частности разрешима;
- (5) если K p -сверхразрешима, то K^G мета- p -нильпотентна;
- (6) $K \leq O_{\pi(K)}(G)$.

Лемма 2 [4, лемма 4.1.10]. Пусть $G = AB$, где A и B – тотально перестановочные (взаимно перестановочные) подгруппы группы G . Если N нормальная подгруппа группы G , то G/N представима в виде произведения тотально перестановочных (взаимно перестановочных) подгрупп AN/N и BN/N .

Напомним, что картеровой подгруппой группы называют нильпотентную самонормализуемую подгруппу [7]. Гашюцевой подгруппой [7] группы G называют подгруппу H , удовлетворяющую следующим двум условиям:

- (1) H сверхразрешима;
- (2) если $H \leq H_1 < T \leq G$, то $|T:H_1|$ – не простое число.

Лемма 3 [8]. (1) Пусть G – группа, A – разрешимая подгруппа, N – разрешимая нормальная в G подгруппа. Если K – картерова подгруппа в A , то KN/N – картерова подгруппа в AN/N .

(2) Пусть K – картерова подгруппа разрешимой группы G . Если K_1 – картерова подгруппа группы G , то существует $g \in G$, такой что $K_1^g = K$.

В неразрешимой группе картерова подгруппы могут и не существовать. Таким примером является простая группа порядка 60 (A_5). Однако картерова подгруппы сопряжены в любой группе, в которой они существуют [9].

Лемма 4 [8]. (1) В любой разрешимой группе гашюцевы подгруппы существуют и сопряжены между собой.

(2) Пусть G – группа, H – ее подгруппа, $N \triangleleft G$. Если L – гашюцева подгруппа в H , то LN/N – гашюцева подгруппа в HN/N .

В неразрешимых группах гашюцевы подгруппы могут иметь разные порядки. Так, например, в простой группе порядка 60 гашюцевы подгруппы имеют порядки 10 и 6. В частности, в неразрешимых группах гашюцевы подгруппы могут быть не сопряжены.

Критерии разрешимости группы со слабо перестановочными подгруппами.

Определение 4. Подгруппы A и B группы G будем называть слабо перестановочными, если $A = \langle A_1, A_2 \rangle, B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2, B_2 перестановочны.

Теорема 1. Пусть A и B – разрешимые подгруппы группы G и $G = AB$. Группа G разрешима в каждом из следующих случаев:

- (1) каждая картерова подгруппа из A слабо перестановочна с каждой картеровой подгруппой из B ;

(2) *картерова подгруппа в A имеет нечетный порядок и каждая картерова подгруппа из A слабо перестановочна с каждой гашюцевой подгруппой из B .*

Доказательство. Оба утверждения теоремы 1 будем доказывать одновременно с помощью индукции по порядку группы. Пусть $K = \langle K_1, K_2 \rangle$ – картерова подгруппа из A (картерова подгруппа нечетного порядка в случае (2)) и $H = \langle H_1, H_2 \rangle$ – картерова (гашюцева в случае (2)) подгруппа из B . Здесь K_1, H_1 – субнормальные в G подгруппы, а подгруппы K_2 и H_2 перестановочны. По лемме 1 (3), (4) K_1^G нильпотентна в обоих случаях, а H_1^G нильпотентна в случае (1) и метанильпотентна в случае (2). Поэтому $N = K_1^G H_1^G$ – нормальная нильпотентная (метанильпотентная в случае (2)) подгруппа, в частности, N – разрешимая подгруппа группы G . Фактор-группа $G/N = (AN/N)(BN/N)$, где $AN/N \cong A/A \cap N$ и $BN/N \cong B/B \cap N$ – разрешимые подгруппы. По лемме 3 (1) KN/N – картерова подгруппа (картерова подгруппа нечетного порядка в случае (2)) в AN/N , а HN/N – картерова подгруппа по лемме 3 (1) (гашюцева по лемме 4 (2) в случае (2)) подгруппа из BN/N соответственно. Так как $K_1 \leq N$ и $H_1 \leq N$, то $KN/N = K_2N/N$ и $HN/N = H_2N/N$ перестановочны. По [8, теорема 1] фактор-группа G/N разрешима, значит, группа G разрешима.

Теорема 2. Пусть A и B – разрешимые подгруппы группы G и $G = AB$. Группа G разрешима в каждом из следующих случаев:

(1) *каждая силовская подгруппа из A слабо перестановочна с каждой силовской подгруппой из B ;*

(2) *каждая силовская подгруппа из A слабо перестановочна с каждой картеровой подгруппой из B ;*

(3) *подгруппа A имеет нечетный порядок и каждая силовская подгруппа из A слабо перестановочна с каждой гашюцевой подгруппой из B .*

Доказательство. Пусть $P = \langle P_1, P_2 \rangle$ – силовская p -подгруппа из A , $Q = \langle Q_1, Q_2 \rangle$ – силовская q -подгруппа из B и $K = \langle K_1, K_2 \rangle$ – картерова (гашюцева) подгруппа из B , где P_1 и $Q_1(K_1)$ субнормальны в G , а P_2 и $Q_2(K_2)$ перестановочны. По лемме 1 (6), (3), (4) $P_1 \leq O_p(G)$, $Q_1 \leq O_q(G)$, K_1^G нильпотентна (метанильпотентна, если K – гашюцева), в частности, K_1^G разрешима в любом случае. Ясно, что $N = O_p(G)O_q(G)$ ($N = O_p(G)K_1^G$) – нормальная разрешимая подгруппа группы G и фактор-группа $G/N = (AN/N)(BN/N)$, где AN/N и BN/N разрешимы. Также ясно, что $PN/N = P_2N/N$ – силовская p -подгруппа из AN/N .

(1) Подгруппа $QN/N = Q_2N/N$ является q -подгруппой в BN/N . По условию подгруппы P_2 и Q_2 перестановочны, поэтому PN/N и QN/N перестановочны. Согласно [8, теорема 2 (1)] фактор-группа G/N разрешима, а значит, группа G разрешима.

(2) По лемме 3 (1) $KN/N = K_2N/N$ – картерова подгруппа из BN/N . По условию подгруппы P_2 и K_2 перестановочны, поэтому подгруппы PN/N и KN/N перестановочны. Согласно [8, теорема 2 (2)] фактор-группа G/N разрешима, а значит, группа G разрешима.

(3) По лемме 4 (2) $KN/N = K_2N/N$ – гашюцева подгруппа из BN/N . По условию подгруппы P_2 и K_2 перестановочны, поэтому подгруппы PN/N и KN/N перестановочны. Согласно [8, теорема 2 (3)] фактор-группа G/N разрешима, а значит, группа G разрешима.

Критерии разрешимости группы со слабо взаимно перестановочными (слабо тотально перестановочными) подгруппами.

Теорема 3. Пусть p – простое число и группа $G = AB$, где A и B – слабо взаимно перестановочные подгруппы группы G . Тогда справедливы следующие утверждения:

(1) *если подгруппы A и B разрешимы, то G разрешима;*

(2) *если подгруппы A и B p -разрешимы, то G p -разрешима.*

Доказательство. Пусть $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2, B_2 взаимно перестановочны. Подгруппы A_1^G и B_1^G нормальны в группе G .

(1) По лемме 1 (2) подгруппы A_1^G и B_1^G разрешимы и подгруппа $N = A_1^G B_1^G$ разрешима. Фактор-группа $G/N = (A_2N/N)(B_2N/N)$ – произведение взаимно перестановочных подгрупп A_2N/N и B_2N/N по лемме 2. По [4, теорема 4.1.15] фактор-группа G/N разрешима, а значит, G разрешима.

(2) По лемме 1 (1) подгруппы A_1^G и B_1^G p -разрешимы и подгруппа $N = A_1^G B_1^G$ p -разрешима. Фактор-группа $G/N = (A_2 N/N)(B_2 N/N)$ – произведение взаимно перестановочных подгрупп $A_2 N/N$ и $B_2 N/N$ по лемме 2. По [4, теорема 4.1.15] фактор-группа G/N p -разрешима, а значит, G p -разрешима.

Следствие 1. Пусть p – простое число и группа $G = AB$, где A и B – слабо тотально перестановочные подгруппы группы G . Тогда справедливы следующие утверждения:

(1) если подгруппы A и B разрешимы, то G разрешима;

(2) если подгруппы A и B p -разрешимы, то G p -разрешима.

Доказательство. По условию $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2 и B_2 тотально перестановочны. Так как тотально перестановочные подгруппы являются взаимно перестановочными подгруппами, то подгруппы A и B слабо взаимно перестановочны. Тогда по теореме 3 группа G разрешима в случае (1) и p -разрешима в случае (2).

О корадикале группы, факторизуемой слабо тсс-перестановочными подгруппами (слабо тсс-подгруппами).

Пусть $\mathfrak{F}$ – формация и G – группа. Пересечение всех нормальных подгрупп группы G , фактор-группы по которым принадлежат $\mathfrak{F}$, обозначается через $G^{\mathfrak{F}}$ и называется $\mathfrak{F}$ -корадикалом группы G . В случае, когда $\mathfrak{F} = \mathfrak{N}$ или $\mathfrak{F} = \mathfrak{U}$, корадикал называют нильпотентным или сверхразрешимым соответственно.

Развитие тотально и взаимно перестановочных подгрупп привело, в частности, к таким понятиям как тсс-перестановочные подгруппы и тсс-подгруппы.

Определение 5 [10]. Подгруппы A и B группы G называются тсс-перестановочными, если для любой подгруппы X из A и для любой подгруппы Y из B существует элемент $u \in \langle X, Y \rangle$ такой, что $XY^u \leq G$.

По аналогии с определениями слабо взаимно перестановочных (слабо тотально перестановочных) подгрупп введем следующее понятие.

Определение 6. Подгруппы A и B группы G будем называть слабо тсс-перестановочными, если $A = \langle A_1, A_2 \rangle$, $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2, B_2 тсс-перестановочны.

Лемма 5. Пусть A и B – тсс-перестановочные подгруппы группы G и $N \triangleleft G$. Тогда AN/N и BN/N – тсс-перестановочные подгруппы группы G/N .

Доказательство. Пусть X/N – подгруппа группы AN/N , а Y/N – подгруппа группы BN/N . Так как $N \leq X \leq AN$, то по тождеству Дедекинда $X = X \cap AN = N(X \cap A)$. Аналогично, $Y = Y \cap BN = N(Y \cap B)$. Поскольку $X \cap A \leq A$, а $Y \cap B \leq B$, то из тсс-перестановочности подгрупп A и B получаем, что $(X \cap A)(Y \cap B)^u \leq G$ для некоторого элемента $u \in \langle X \cap A, Y \cap B \rangle$. Тогда $(X/N)(Y/N)^{uN} = (X \cap A)(Y \cap B)^u N/N \leq G/N$ для некоторого элемента $uN \in \langle X \cap A, Y \cap B \rangle N/N \leq \langle A, B \rangle N/N = \langle A/N, B/N \rangle$. По определению 5 подгруппы AN/N и BN/N тсс-перестановочны в G/N .

Теорема 4. Пусть $G = AB$, A и B – слабо тсс-перестановочные подгруппы группы G .

(1) если A и B сверхразрешимы, то сверхразрешимый корадикал группы G метанильпотентен;

(2) если A и B тсс-сверхразрешимы, то p -сверхразрешимый корадикал группы G мета- p -нильпотентен.

Доказательство. (1) Пусть $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2 и B_2 тсс-перестановочны. Тогда A_1^G и B_1^G нормальны в группе G и метанильпотентны по лемме 1 (4). Подгруппа $N = A_1^G B_1^G$ метанильпотентна и нормальна в G . Фактор-группа $G/N = (AN/N)(BN/N) = (A_2 N/N)(B_2 N/N)$ – произведение тсс-перестановочных подгрупп по лемме 5. Тогда по [11, теорема А] сверхразрешимый корадикал метанильпотентен.

(2) Пусть $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2 и B_2 тсс-перестановочны. Тогда A_1^G и B_1^G нормальны в группе G и мета- p -нильпотентны по лемме 1 (5). Подгруппа $N = A_1^G B_1^G$ мета- p -нильпотентна и нормальна в G . Фактор-группа $G/N = (AN/N)(BN/N) = (A_2 N/N)(B_2 N/N)$ – произведение тсс-перестановочных подгрупп по лемме 5. Тогда по [3, теорема 4.1] p -сверхразрешимый корадикал мета- p -нильпотентен.

В [12] А.А. Трофимук ввел следующее определение.

Определение 7. Подгруппа A группы G называется *tcc-подгруппой*, если существует подгруппа T группы G такая, что $G = AT$ и подгруппы T и A *tcc-перестановочны*.

Определение 8. Подгруппу A группы G будем называть *слабо tcc-подгруппой*, если $A = \langle A_1, A_2 \rangle$, где A_1 субнормальна в G , а A_2 – *tcc-подгруппа*.

Теорема 5. Пусть $G = AB$, A и B – *слабо tcc-подгруппы* группы G .

(1) Если подгруппы A и B *сверхразрешимы*, то *сверхразрешимый корадикал метанильпотентен*.

(2) Если подгруппы A и B *p-сверхразрешимы*, то *p-сверхразрешимый корадикал метар-нильпотентен*.

Доказательство. (1) Пусть $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2 и B_2 – *tcc-подгруппы*. Тогда A_1^G и B_1^G нормальны в группе G и метанильпотентны по лемме 1 (4). Тогда A_1^G и B_1^G нормальны в группе G и метанильпотентны по лемме 1 (4). Подгруппа $N = A_1^G B_1^G$ метанильпотентна и нормальна в G . Фактор-группа $G/N = (A_2 N/N)(B_2 N/N)$ – произведение *tcc-подгрупп* $A_2 N/N$ и $B_2 N/N$ по [12, лемме 3.1]. Тогда по [12, теорема 4.1] *сверхразрешимый корадикал метанильпотентен*.

(2) Пусть $A = \langle A_1, A_2 \rangle$ и $B = \langle B_1, B_2 \rangle$, где A_1, B_1 субнормальны в G , а A_2 и B_2 *tcc-перестановочны*. Тогда A_1^G и B_1^G нормальны в группе G и метар-нильпотентны по лемме 1 (5). Подгруппа $N = A_1^G B_1^G$ метар-нильпотентна и нормальна в G . Фактор-группа $G/N = (A_2 N/N)(B_2 N/N)$ – произведение *tcc-подгрупп* $A_2 N/N$ и $B_2 N/N$ по [12, лемме 3.1]. Тогда по [12, следствие 4.1] *p-сверхразрешимый корадикал метар-нильпотентен*.

Замечание. Полученные результаты позволяют теоремы о кратно факторизуемых группах с условием взаимно перестановочности (тотально перестановочности) некоторых подгрупп из сомножителей распространить на группы с условием слабо взаимно перестановочности (слабо тотально перестановочности) [4, теорема 4.1.31, теорема 4.1.31, теорема 4.33, теорема 4.1.35].

Литература

1. Монахов, В. С. Введение в теорию конечных групп и их классов / В. С. Монахов. – Минск : Вышэйшая школа, 2006. – 207 с.
2. Carrocca, A. *p-supersolvability of factorized finite groups* / A. Carrocca // Hokkaido Math. J. – 1992. – № 4. – P. 395–403.
3. Asaad, M. On the supersolvability of finite groups / M. Asaad, A. Shaalan // Arch. Math. – 1989. – № 53. – P. 318–326.
4. Ballester-Bolinches, A. Product finite groups / A. Ballester-Bolinches, R. Estaban-Romero, M. Asaad. – Berlin ; New York : Walter de Gruyter, 2010. – 334 p.
5. Хуан, Ц. Конечные группы со слабо субнормальными и частично субнормальными подгруппами / Ц. Хуан, Б. Ху, А. Н. Скиба // Сиб. мат. журн. – 2021. – Т. 62, № 1. – С. 210–220.
6. Lennox, J. C. Subnormal subgroups of groups / J. C. Lennox, S. E. Stonehewer. – Oxford : Clarendon Press, 1987. – 270 p.
7. Doerk, K. Finite soluble groups / K. Doerk, T. Hawkes. – de Gruyter Exp. Math. 4. – Berlin : Walter de Gruyter, 1992. – 901 p.
8. Монахов, В. С. О разрешимости группы с перестановочными подгруппами / В. С. Монахов // Мат. заметки. – 2013. – Т. 94, № 3. – С. 436–441.
9. Вдовин, Е. П. Картеровы подгруппы конечных групп / Е. П. Вдовин // Мат. тр. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 20–106.
10. Arroyo-Jorda, M. Conditional permutability of subgroups and certain classes of groups / M. Arroyo-Jorda, P. Arroyo-Jorda // J. Algebra. – 2017. – V. 476. – P. 395–414.
11. Guo, W. Criteria of supersolvability for products of supersoluble groups / W. Guo, P. Shum, A. N. Skiba // Publ. Math. Debrecen. – 2006. – V. 68, № 3–4. – P. 433–499.
12. Trofimuk, A. A. On the supersolvability of a group with some *tcc*-subgroups / A. A. Trofimuk // J. Algebra Appl. – 2021. – № 20 (3). – 2150020 (18 page).

Определение скорости волны при гидроударе в двухслойных ортотропных трубах

В.В. МОЖАРОВСКИЙ, С.В. КИРГИНЦЕВА

В работе рассматривается компьютерная реализация методик расчета скорости волны при гидравлическом ударе в двухслойных ортотропных трубах. Представлены примеры расчета параметров гидроудара для слоистых труб из композитов.

Ключевые слова: скорость волны, гидроудар, композиционный материал, ортотропия, матрица, волокна.

The paper considers computer implementation of the methods for calculating the wave velocity during hydraulic shock in two-layer orthotropic pipes. The examples of calculating the parameters of hydraulic shock for layered pipes made of composites are presented.

Keywords: wave velocity, hydraulic shock, composite material, orthotropy, matrix, fibers.

Введение. На современном уровне создания и развития математических моделей при расчете напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из композиционных материалов (таких, как трубы, сосуды) имеется обширная литература [1]–[8]. Но в то же время возникает необходимость создания компьютерных программ расчета для сложных материалов, таких как композиты, в элементах конструкций с учетом изменяющихся граничных и краевых условий, динамических нагрузжений и упрочняющих свойств материалов. Исследование в данной области является актуальным и широко применяется при создании инженерных методик расчета во всем мире. Несмотря на большие достижения в области расчета слоистых цилиндрических тел с учетом эффектов композитов, проблема решения задач с различными граничными условиями применительно к моделированию работы колебаний, например, трубопроводов, реновации и перепрофилировании трубопроводов, слоистых сосудов из композитов и других элементов достаточно полно не освещена.

Во всем мире широко используются новые технологии о реновации и перепрофилировании трубопроводов, исследований процесса гидроудара. Например, можно привести *технология CIPP («Cured-in-place pipe»)* трубопроводов. Многолетняя эксплуатация трубопроводов неразрывно связана с такими явлениями, как коррозия, утечка, разрывы, пренебрежение которыми могут вызывать просадки дорог и экологические аварии, что, в свою очередь, имеет социальные последствия. Решением этой проблемы могут быть бестраншейные методы восстановления трубопроводов, которые заключаются в ремонте существующих трубопроводов без выемки грунта. Поэтому возникает необходимость создания автоматизированной методики расчета прочности, диагностики и оптимального подбора материала для восстанавливающих трубопроводов на основе разработки и построения новых математических моделей и методик. Одним из таких методов является футеровка или метод полимеризации на месте трубы, процесс использования которой заключается во вставке пропитанной смолой гильзы в изношенный заглубленный трубопровод. В результате получается новая труба внутри изношенной трубы.

Следовательно, необходимо шире разрабатывать и развивать теории [1], [2], на базе развития механики элементов конструкций из ортотропного материала, описывающие динамические явления гидроудара при течении жидкости. В частности, сюда входит расчет параметров, влияющих на разрушения труб при эксплуатации. Ключевым параметром является скорость волны, которая создает избыточное давление в трубе. Сложность решения данной задачи заключается в анизотропии свойств материала трубы и её слоистость. Хотя ранее была построена теория расчета явления гидроудара для многослойной ламинированной трубы с одинаковыми физическими характеристиками слоев [3], но необходимо делать расчет параметров гидроудара для слоистых композитных труб из разных материалов. В данной же статье предложен расчет параметров гидроудара для трубы, учитывающий разные упругие свойства и толщины слоев композита по новой методике [2].

Целью работы являются определение скорости волны при гидроударе для двухслойных труб из композитов, а также решение задачи компьютерной реализации расчета вышеуказанных параметров для труб из композиционных материалов и сравнение расчета с другими методиками.

Постановка задачи и методики решения. Рассматривается цилиндрическая двухслойная труба из ортотропных материалов (композитов) (внутренний радиус – r_a , внешний – r_c , межслойный радиус для двухслойной трубы – r_b). Труба находится под действием внутреннего нагружения P , внешнее давление отсутствует. На рисунке 1 показана модель двухслойной трубы из ортотропных материалов с футеровкой (покрытием), которая может быть и трансверсально-изотропной. Необходимо определить скорость волны при гидроударе при течении жидкости в двухслойных композитных трубах.

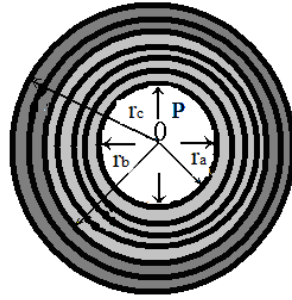


Рисунок 1 – Модель двухслойной трубы из ортотропных материалов с футеровкой

Используя методику [2], определяем скорость волны при гидравлическом ударе в ортотропных трубах с ортотропным покрытием:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1+K\Omega}},$$

$$\Omega = \frac{2}{\alpha} \left[-1 + \left(\frac{-\beta}{\alpha} + 1 \right) \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^{-2k_1} \times \frac{\left[\alpha \left(1 - (r_c/r_b)^{-2k_2} g/\gamma \right) - g \left(1 - (r_c/r_b)^{-2k_2} \right) \right]}{\beta \left(1 - (r_a/r_b)^{-2k_1} \right) \left(1 - (r_c/r_b)^{-2k_2} g/\gamma \right) - g \left(1 - (r_c/r_b)^{-2k_2} \right) \left(1 - (r_a/r_b)^{-2k_1} \beta/\alpha \right)} \right],$$

$$\beta = A_{12}^{(1)} - k_1 A_{11}^{(1)}, \quad \alpha = A_{11}^{(1)} k_1 + A_{12}^{(1)}, \quad \gamma = A_{11}^{(2)} k_2 + A_{12}^{(2)}, \quad g = A_{12}^{(2)} - k_2 A_{11}^{(2)},$$

$$A_{11} = \frac{E_r}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}}, \quad A_{12} = \nu_{r\theta} \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}}, \quad A_{22} = \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}},$$

где r_a – внутренний радиус, r_c – внешний радиус, r_b – межслойный радиус для двухслойной трубы; верхние индексы «1» и «2» характеризуют материалы покрытия и трубы.

Коэффициенты обобщенного закона Гука определяются по зависимостям, в которых упругие характеристики материала вычисляем по правилу смесей [2]:

$$E_r = E_m \frac{1 + \eta V}{1 - \eta V}, \quad E_\theta = V E_f + (1 - V) E_m, \quad \nu_{r\theta} = V \nu_f + (1 - V) \nu_m,$$

$$\eta = \frac{E_f - E_m}{E_f + E_m}, \quad G_{r\theta} = \frac{G_f G_m}{G_f (1 - V) + G_m V},$$

где E_f , G_f , ν_f – технические постоянные волокна, E_m , G_m , ν_m – технические постоянные матрицы, ρ – плотность жидкости, K – объёмный модуль упругости жидкости, V – объемное содержание волокон.

Для тестирования различных методик расчета скорости волны при гидроударе используется методика [3] расчета ламинированных труб, в которой скорость волны определяется следующим образом:

$$C = c^* / \sqrt{1 + a_{22}DK},$$

где $c^* = \sqrt{K/\rho}$ – скорость звука в жидкости, a_{22} – коэффициент матрицы $[abd]$, D – диаметр трубы; параметры c^* и K являются константами для различных жидкостей. Далее, следуя обозначениям в [3], запишем используемые матричные соотношения.

Матрица $[abd]$ имеет вид:

$$[abd] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} & b_{21} & b_{22} & b_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} & b_{61} & b_{62} & b_{66} \\ b_{11} & b_{21} & b_{61} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{62} & d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} = [ABD]^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}^{-1},$$

$$\text{где } A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k - z_{k-1}), \quad B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k^2 - z_{k-1}^2), \quad D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k^3 - z_{k-1}^3),$$

Коэффициенты $\bar{Q}_{ij}$ вычисляются по зависимостям:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{22}n^4, \quad \bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})n^2m^2 + Q_{12}(n^4 + m^4),$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})nm^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n^3m, \quad \bar{Q}_{22} = Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{22}m^4,$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})nm^3, \quad \bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{66}(n^4 + m^4),$$

где $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$, $Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) = \nu_{21}E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{66} = G_{12}$; модули упругости E_{ij} , коэффициенты Пуассона ν_{ij} , модуль сдвига G задаются в основных направлениях (т. е. направлениях вдоль волокон и перпендикулярно им), θ – направление волокон в слое.

С помощью формул, предложенных российским ученым Н.Е. Жуковским, можно легко определять предельно возможное значение напора при гидравлическом ударе (прямой удар) [7]:

$$\Delta P = \pm \rho \cdot C \cdot v_0 \quad \text{или} \quad \Delta H = \pm C \cdot v_0 / g,$$

где ΔP – ударное повышение давления; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; C – скорость ударной волны; $g=9,82$ м/с² – ускорение свободного падения; H – пьезометрический напор; $v_0 = 4Q/(\pi D^2)$ – скорость жидкости в трубе; Q – расход жидкости; D – внутренний диаметр трубы.

Максимальное давление, возникающее в трубе, можно определять также по программе в Excel [8]:

$$H_{\max} = H_0 + Dh_{\text{hammer}} + Dh_{\text{friction}},$$

$$\text{где } Dh_{\text{friction}} = I \frac{Lv_1^2}{2Dg}, \quad Dh_{\text{hammer}} = \frac{Cv_1}{g}, \quad I - \text{коэффициент трения трубы; } v_1 - \text{средняя скорость}$$

жидкости в трубе, ($v_1 = Q/A$, где H – значение напора в м, вод. ст., A – площадь поперечного сечения трубы). Расчет по этой методике хорошо применять для однослойных изотропных труб.

Расчет примеров и анализ результатов. По указанным методикам расчета разработана программа в среде *Delphi*, которая адаптирована для двухслойных труб из композитов и проведен расчет скорости волны при гидроударе в двухслойных ортотропных трубах. Для тестирования методик взят пример из книги [3, с. 161] и сделан расчет по разным методикам, исследовано изменения скорости волны при гидроударе в зависимости от изменения модуля упругости материала композита.

Пример 1 ([3]). Рассматривается ортотропная труба [3] со следующими физико-механическими характеристиками: $E_1 = 39 \cdot 10^9$ Н/м², $E_{2\text{нач}} = 8,6 \cdot 10^9$ Н/м², $\nu_{12} = 0,28$,

$G_{12} = 3,8 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, диаметр трубы $D = 0,1 \text{ м}$, количество слоев $N = 10$, толщина слоев $h = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $K = 219 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, плотность жидкости $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. На рисунке 2 показано влияние изменения модуля упругости E_2 на скорость волны при гидроударе.

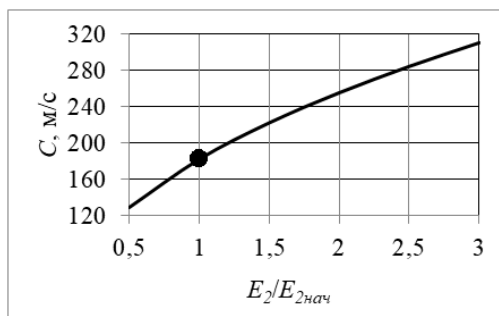


Рисунок 2 – График зависимости скорости волны при гидроударе от изменения модуля упругости материала трубы $E_2/E_{2нач}$ (расчет по методике [3]); точка на графике, соответствующая значению $E_2/E_{2нач} = 1$, совпадает со значением $C = 182 \text{ м/с}$ из примера в [3]

Произведем исследование влияния изменения толщин слоев h для двухслойной трубы с такими же физическими характеристиками, как в примере 1. На рисунке 3 показано влияние толщины слоев h на скорость волны при гидроударе для двухслойной трубы. Из рисунка 3 видно хорошее совпадение кривых при расчете по различным методикам.

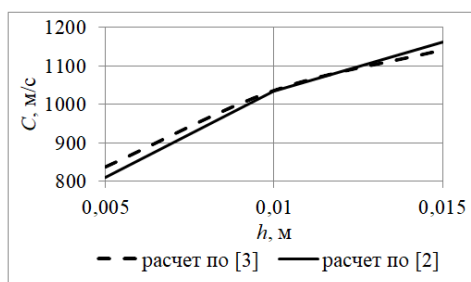


Рисунок 3 – Графики зависимости скорости волны C от толщины слоев h

Влияние изменения плотности транспортируемой жидкости на скорость волны при гидроударе рассмотрено в примере 2.

Пример 2. Начальные данные соответствуют примеру 2. Диаметр трубы $D = 0,1 \text{ м}$, толщина слоев $h = 0,005 \text{ м}$ и $h = 0,01 \text{ м}$. Влияние плотности жидкости ρ на скорость волны C показано на рисунке 4 (расчет по методике [2]).

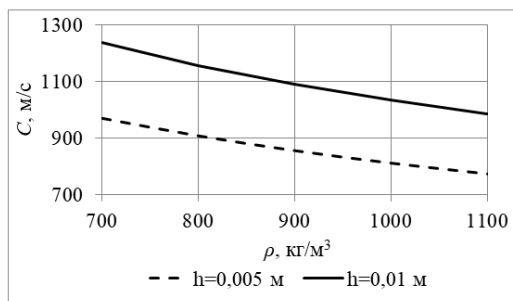


Рисунок 4 – Графики зависимости скорости волны C от плотности жидкости ρ

Пример 3. Рассмотрена труба из композита, состоящая из полиэтилена и армирующей проволки [4]: (модули упругости и коэффициенты Пуассона трубы равны $E_f = 207 \text{ ГПа}$, $\nu_f = 0,3$, $E_m = 1,43 \text{ ГПа}$, $\nu_m = 0,4$ с радиусами $r_a = 0,12 \text{ м}$, $r_c = 0,15 \text{ м}$, $r_b = 0,135 \text{ м}$. На рисунке 5 показано влияние объёмного содержания волокна V в матрице композиционного материала на скорость волны при гидроударе для двухслойной трубы. Расчет проводился по методике, изложенной в [2].

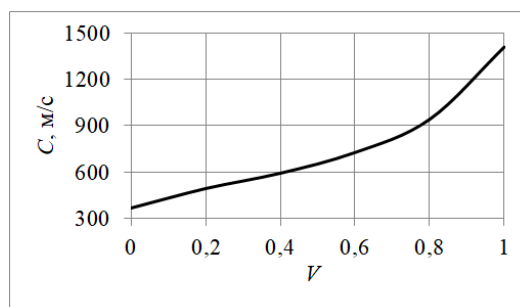


Рисунок 5 – Графики зависимости скорости волны C от объемного содержания волокна V в матрице материала

Заключение. Представлены методики расчета скорости волны при гидроударе при течении жидкости в двухслойных трубах из композитов. Из рисунка 3 видно, что значения скоростей волны при гидравлическом ударе по методикам, представленным в [2] и [3], близки по значениям, отличие составляет не более 10 %. Для оптимизации трубопроводов из композиционных материалов необходимо производить компьютерный расчет скорости волны, далее определять возникающие дополнительные напряжения, что позволит предотвратить разрушения труб при эксплуатации.

Литература

1. Можаровский, В. В. Обзор литературы о реновации и перепрофилировании трубопроводов и явлений гидроудара с использованием инноваций и компьютерных технологий / В. В. Можаровский, Ю. В. Василевич, С. В. Киргинцева // Теоретическая и прикладная механика. – 2024. – Вып. 39. – С. 86–99.
2. Можаровский, В. В. Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 44–51.
3. Pavlou, Dimitrios G. Composite materials in piping applications / Dimitrios G. Pavlou ; Technological Institute of Halkida (TEI-Halkida). – Greece : Mechanical Engineering Department, 2013. – 395 p.
4. Wuyi, Wan. Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement / Wan Wuyi, Mao Xinwei // Shock and Vibration. – 2016. – Vol. 5. – P. 1–10.
5. Titaa, Volnei. Theoretical models to predict the mechanical behavior of thick composite tubes / Volnei Titaa, Mauricio Francisco Caliri Júniora, Ernesto Massaroppi Juniorb // Materials Research. – 2012. – № 15 (1). – P. 70–80.
6. Можаровский, В. В. Влияние армирования труб из композита на параметры гидроудара / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Полимерные материалы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 64–71.
7. Можаровский, В. В. Влияние расположения волокон в трубе из композита на параметры гидравлического удара / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 30–35.
8. Water hammer calculation excel sheet [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.coursehero.com/file/46340495/Water-Hammer-Calculationxls/>. – Date of access : 15.05.2023.

Дистанционно регулярный граф с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ не существует

ХАЙАН ЛИ¹, К.С. ЕФИМОВ^{2,3}, А.А. МАХНЁВ^{2,4}

Для дистанционно регулярного графа Γ диаметра 3 граф Γ_2 будет сильно регулярным, если Γ имеет собственное значение $a_2 - c_3$. Если дополнительно Γ имеет собственное значение $\theta_2 = 0$, то Γ имеет массив пересечений $\{ux + yz, yz - y, xy - x; 1, x + z, yz\}$. Дистанционно регулярный граф диаметра 3 с собственным значением $\theta_1 = a_3$ называется графом Шилла. Для графа Шилла число $a = a_3$ делит k и полагают $b = b(\Gamma) = k/a$. Имеется 3 допустимых массива пересечений примитивных дистанционно регулярных графов диаметра 3 и степени 60. Все они отвечают графам Шилла. Граф с массивом пересечений $\{60, 42, 18; 1, 6, 40\}$ имеет $b = 3$. Граф с массивом пересечений $\{60, 45, 8; 1, 12, 50\}$ принадлежит указанной серии для $x = 2, y = 5, z = 10$ и не существует. Наконец, граф Шилла с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ имеет $b_2 = 3$ и принадлежит серии $\{b(b+1)s, (bs+s+1)(b-1), bs; 1, bs, (b^2-1)s\}$ для $b = 5, s = 2$. В работе доказано, что граф с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ не существует.

Ключевые слова: граф Шилла, дистанционно регулярный граф.

For a distance-regular graph Γ of diameter 3, graph Γ_2 will be strongly regular if Γ has an eigenvalue $a_2 - c_3$. If additionally Γ has an eigenvalue $\theta_2 = 0$, then Γ has an intersection array $\{ux + yz, yz - y, xy - x; 1, x + z, yz\}$. A distance-regular graph of diameter 3 with eigenvalue $\theta_1 = a_3$ is called a Schilla graph. For the Schilla graph, the number $a = a_3$ divides k and we set $b = b(\Gamma) = k/a$. There are 3 admissible intersection arrays of primitive distance-regular graphs of diameter 3 and degree 60. All of them correspond to Schilla graphs. The graph with intersection array $\{60, 42, 18; 1, 6, 40\}$ has $b = 3$. The graph with intersection array $\{60, 45, 8; 1, 12, 50\}$ belongs to the specified series for $x = 2, y = 5, z = 10$ and does not exist. Finally, the Schilla graph with intersection array $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ has $b_2 = 3$ and belongs to the series $\{b(b+1)s, (bs+s+1)(b-1), bs; 1, bs, (b^2-1)s\}$ for $b = 5, s = 2$. The work proves that the graph with intersection array $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ does not exist.

Keywords: Schilla graph, distance regular graph.

Введение. Рассматриваются неориентированные графы без петель и кратных ребер. Если a, b – вершины графа Γ , то через $d(a, b)$ обозначается расстояние между a и b , а через $\Gamma_i(a)$ – подграф графа Γ , индуцированный множеством вершин, которые находятся на расстоянии i в Γ от вершины a . Подграф $\Gamma_1(a)$ называется *окрестностью вершины a* и обозначается через $[a]$. Через $a^\perp$ обозначается подграф, являющийся шаром радиуса 1 с центром a .

Граф Γ называется *регулярным графом степени k* , если $[a]$ содержит k вершин для любой вершины a из Γ . Граф Γ называется *реберно регулярным графом с параметрами (v, k, λ)* , если Γ содержит v вершин, является регулярным степени k и каждое ребро из Γ лежит в λ треугольниках. Граф Γ называется *вполне регулярным графом с параметрами (v, k, λ, μ)* , если Γ реберно регулярен с соответствующими параметрами и подграф $[a] \cap [b]$ содержит μ вершин в случае $d(a, b) = 2$. Вполне регулярный граф диаметра 2 называется *сильно регулярным графом*. Число вершин в $[a] \cap [b]$ обозначим через $\lambda(a, b)$ (через $\mu(a, b)$), если $d(a, b) = 1$ (если $d(a, b) = 2$), а соответствующий подграф назовем (μ) λ -подграфом.

Если вершины u, w находятся на расстоянии i в Γ , то через $b_i(u, w)$ (через $c_i(u, w)$) обозначим число вершин в пересечении $\Gamma_{i+1}(u)$ (в пересечении $\Gamma_{i-1}(u)$ с $[w]$). Граф диаметра d называется *дистанционно регулярным с массивом пересечений $\{b_0, \dots, b_{d-1}; c_1, \dots, c_d\}$* , если значения $b_i = b_i(u, w)$ и $c_i = c_i(u, w)$ не зависят от выбора вершин u, w на расстоянии i . Положим $a_i = k - b_i - c_i$ и $k_i = |\Gamma_i(u)|$ (значение k_i не зависит от выбора вершины u). Числа пересечений графа p_{ij}^l и параметры Крейна q_{ij}^l определены в [1] (стр. 43 и 48 соответственно).

Пусть Γ является дистанционно регулярным графом диаметра d . Для $i \in \{1, 2, \dots, d\}$ граф Γ_i определен на множестве вершин графа Γ и две вершины u, w смежны в Γ_i тогда и только тогда, когда $d_{\Gamma(u, w)} = i$.

Для дистанционно регулярного графа Γ диаметра 3 граф Γ_2 будет сильно регулярным, если Γ имеет собственное значение $a_2 - c_3$ (см. [2]). Если дополнительно Γ имеет собственное значение $\theta_2 = 0$, то Γ имеет массив пересечений $\{ux + yz, yz - y, xy - x; 1, x + z, yz\}$ (см. [3]).

Графом Шилла называется дистанционно регулярный граф диаметра 3 с собственным значением $\theta_1 = a_3$ (см. [4]). Для графа Шилла число $a = a_3$ делит k и полагают $b = b(\Gamma) = k/a$.

Граф Шилла имеет массив пересечений $\{ab, (a + 1)(b - 1), b_2; 1, c_2, a(b - 1)\}$.

Имеется 3 допустимых массива примитивных дистанционно регулярных графов диаметра 3, степени 60 с числом вершин не большим 1024 (см. [1]). Все они отвечают графам Шилла.

Граф с массивом пересечений $\{60, 42, 18; 1, 6, 40\}$ имеет $b = 3$. Граф с массивом пересечений $\{60, 45, 8; 1, 12, 50\}$ принадлежит указанной серии для $x = 2, y = 5, z = 10$. Наконец, граф Шилла с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ имеет $b_2 = c_2$ и принадлежит серии $\{b(b + 1)s, (bs + s + 1)(b - 1), bs; 1, bs, (b^2 - 1)s\}$ для $b = 5, s = 2$.

В работе изучается граф Шилла с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$.

Теорема: Дистанционно регулярный граф с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$ не существует.

Тройные числа пересечений. В доказательстве теорем используются тройные числа пересечений (см. [6]).

Пусть Γ – дистанционно регулярный граф диаметра d . Если u_1, u_2, u_3 – вершины графа Γ , r_1, r_2, r_3 – неотрицательные целые числа, не большие d , то $\begin{Bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{Bmatrix}$ – множество вершин $w \in \Gamma$ таких, что $d(w, u_i) = r_i$, $\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} = \left| \begin{Bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{Bmatrix} \right|$. Числа $\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix}$ называются тройными числами пересечений. Для фиксированной тройки вершин u_1, u_2, u_3 вместо $\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix}$ будем писать $[r_1 \ r_2 \ r_3]$.

Пусть u, v, w – вершины графа Γ , $W = d(u, v)$, $U = d(v, w)$, $V = d(u, w)$. Так как имеется точно одна вершина $x = u$ такая, что $d(x, u) = 0$, то число $[0 \ j \ h]$ равно 0 или 1. Отсюда $[0 \ j \ h] = \delta_{jW} * \delta_{hV}$.

Аналогично, $[i \ 0 \ h] = \delta_{iW} * \delta_{hU}$ и $[i \ j \ 0] = \delta_{iU} * \delta_{jV}$.

Другое множество уравнений можно получить, фиксируя расстояние между двумя вершинами из $\{u, v, w\}$ и сосчитав число вершин всех расстояний от третьей. Получим:

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^d [l j h] &= p_{jh}^U - [0 j h], \\ \sum_{l=1}^d [i l h] &= p_{ih}^V - [i 0 h], \\ \sum_{l=1}^d [i j l] &= p_{ij}^W - [i j 0]. \end{aligned} \quad (+)$$

При этом некоторые тройки исчезают. При $|i - j| > W$ или $i + j < W$ имеем $p_{ij}^W = 0$, поэтому $[i j h] = 0$ для всех $h \in \{0, \dots, d\}$.

Положим $S_{ijh}(u, v, w) = \sum_{r,s,t=0}^d Q_{ri} Q_{sj} Q_{th} \begin{bmatrix} u & v & w \\ r & s & t \end{bmatrix}$. Если параметр Крейна $q_{ij}^h = 0$, то $S_{ijh}(u, v, w) = 0$.

Зафиксируем вершины u, v, w дистанционно регулярного графа Γ диаметра 3 и положим

$$\begin{aligned} \{i, j, h\} &= \begin{Bmatrix} u & v & w \\ i & j & h \end{Bmatrix}, [i, j, h] = \begin{bmatrix} u & v & w \\ i & j & h \end{bmatrix}, [i, j, h]' = \begin{bmatrix} u & w & v \\ i & h & j \end{bmatrix}, \\ [i, j, h]^* &= \begin{bmatrix} v & u & w \\ j & i & h \end{bmatrix}, [u, v, w]^{sim} = \begin{bmatrix} u & v & w \\ h & j & i \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Вычисление параметров $[uvw]', [uvw]^*$ и $[uvw]^{sim}$ (симметризация массива тройных чисел пересечений) может дать новые соотношения, позволяющие доказать несуществование графа.

Доказательство теоремы 1. В этом разделе Γ – дистанционно регулярный граф с массивом пересечений $\{60, 52, 10; 1, 10, 48\}$.

Тогда Γ имеет $1 + 60 + 312 + 65 = 438$ вершин, спектр $\{60^1, 12^{73}, 0^{292}, -13^{72}\}$, матрицу

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 73 & 292 & 72 \\ 1 & \frac{73}{5} & 0 & -\frac{78}{5} \\ 1 & 0 & \frac{-73}{13} & \frac{60}{13} \\ 1 & \frac{-73}{5} & \frac{292}{13} & \frac{-576}{65} \end{pmatrix}$$

и числа пересечений:

$$\begin{aligned} p_{11}^1 &= 7, p_{12}^1 = 52, p_{13}^1 = 0, p_{21}^1 = 52, p_{22}^1 = 208, p_{23}^1 = 52, p_{31}^1 = 0, p_{32}^1 = 52, p_{33}^1 = 13 \\ p_{11}^2 &= 10, p_{12}^2 = 40, p_{13}^2 = 10, p_{21}^2 = 40, p_{22}^2 = 226, p_{23}^2 = 45, p_{31}^2 = 10, p_{32}^2 = 45, p_{33}^2 = 10 \\ p_{11}^3 &= 0, p_{12}^3 = 48, p_{13}^3 = 12, p_{21}^3 = 48, p_{22}^3 = 216, p_{23}^3 = 48, p_{31}^3 = 12, p_{32}^3 = 48, p_{33}^3 = 4. \end{aligned}$$

Пусть u, v, w – вершины графа Γ , $\{rst\} = \begin{Bmatrix} u & v & w \\ r & s & t \end{Bmatrix}$ и $[rst] = \begin{bmatrix} u & v & w \\ r & s & t \end{bmatrix}$.

Положим $\Sigma = \Gamma_3(u)$, $\Lambda = \Sigma_2$. Тогда Λ является регулярным графом степени $p_{23}^3 = 48$ на $k_3 = 65$ вершинах.

Лемма 1. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = 3, d(v, w) = 1$. Тогда выполняются следующие утверждения:

$$\begin{aligned} [122] &= -r_{12} - r_{13} - r_{14} + 175, [123] = [132] = r_{12} + r_{13} + r_{14} - 127, \\ [133] &= -r_{12} - r_{13} - r_{14} + 139; \\ [211] &= -r_{14} + 7, [212] = [221] = r_{14} + 41, [222] = r_{12}, \\ [223] &= [232] = -r_{12} - r_{14} + 175, [233] = r_{12} + r_{14} - 127; \\ [311] &= r_{14}, [312] = [321] = -r_{14} + 11, [322] = r_{13} + r_{14} + 33, \\ [323] &= [332] = -r_{13} + 4, [333] = r_{13}, \end{aligned}$$

где $0 \leq r_{13} \leq 4, 120 \leq r_{12} \leq 139, 0 \leq r_{14} \leq 7, 127 \leq r_{12} + r_{14} \leq 139$.

Доказательство.

Упрощения формул (+).

По лемме 1 имеем $[322] = r_{13} + r_{14} + 33 \leq 44$.

Так как $\{u, w\} \cap \Lambda(u) \cap \Lambda(w)$ содержит $98 - [322]$ вершин, то $33 \leq [322] \leq 44$.

Лемма 2. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = d(v, w) = 3$. Тогда выполняются следующие утверждения:

$$\begin{aligned} [122] &= r_{37}, [123] = [132] = -r_{37} + 48, [133] = r_{37} - 36; \\ [212] &= r_{34} + r_{35} - r_{36} - r_{37} + 48, [213] = -r_{34} - r_{35} + r_{36} + r_{37}, [222] \\ &= -r_{35} + r_{36} + 168, [223] = r_{35}, [231] = r_{36}, [232] = -r_{34} + r_{37}, \\ [233] &= r_{34} - r_{36} - r_{37} + 48; \\ [312] &= -r_{34} - r_{35} + r_{36} + r_{37}, [313] = r_{34} + r_{35} - r_{36} - r_{37} + 12, [321] = r_{36}, \\ [322] &= r_{35} - r_{36} - r_{37} + 48, [323] = -r_{35} + r_{37}, [332] = r_{34}, [333] = -r_{34} + r_{36} + 9, \end{aligned}$$

где $0 \leq r_{34} \leq 3, 33 \leq r_{35} \leq 39, 9 \leq r_{36} \leq 12, 36 \leq r_{37} \leq 39, r_{35} \leq r_{37}$.

Доказательство.

Упрощения формул (+).

По лемме 2 имеем $[322] = r_{35} - r_{36} - r_{37} + 48 \leq 42$. Как и выше, $33 \leq [322] \leq 42$.

Найдем число ребер d между $\Lambda(v)$ и $\Lambda_2(v)$. Так как $p_{13}^3 = 12, p_{23}^3 = 48, p_{33}^3 = 4$, то $528 = 12 \cdot 33 + 4 \cdot 33 \leq d \leq 12 \cdot 44 + 4 \cdot 42 = 696$. С другой стороны, $d = 48 \cdot (47 - \lambda)$, поэтому $11 \leq 47 - \lambda \leq 14,5$ и $33,5 \leq \lambda \leq 36$, где λ – среднее значение параметра $\lambda(\Lambda)$.

Лемма 3. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = 3, d(v, w) = 2$. Тогда выполняются следующие утверждения:

$$\begin{aligned} [122] &= -r_{33} + 48, [123] = [132] = r_{33}, [133] = -r_{33} + 12; \\ [211] &= -r_{31} + r_{32} + 8, [212] = r_{29}, [213] = -r_{29} + r_{31} - r_{32} + 40, [221] = -r_{32} + 40, \\ [222] &= -r_{30} + r_{32} + 176, [223] = r_{30}, [231] = r_{31}, [232] = r_{29} + r_{30} - r_{32} + 40, \\ [233] &= r_{29} - r_{30} - r_{31} + r_{32} + 8; \\ [311] &= r_{31} - r_{32} + 2, [312] = -r_{29} + 40, [313] = r_{29} - r_{31} + r_{32} - 30, \end{aligned}$$

$$[321] = r_{32}, [322] = r_{30} - r_{32} + r_{33} + 2, [323] = -r_{30} - r_{33} + 45,$$

$$[331] = -r_{31} + 10, [332] = -r_{29} - r_{30} + r_{32} - r_{33} + 5,$$

$$[333] = -r_{29} + r_{30} + r_{31} - r_{32} + r_{33} - 11,$$

где $28 \leq r_{29} \leq 40$, $29 \leq r_{30} \leq 42$, $6 \leq r_{31} \leq 10$, $0 \leq r_{32} \leq 12$, $3 \leq r_{33} \leq 12$, $r_{32} - r_{31} \leq 2$.

Доказательство.

Упрощения формул (+).

По лемме 3 имеем $[322] = r_{30} - r_{32} + r_{33} + 2 \leq 56$. Как и выше, $31 \leq [322]$.

Пусть $d(u, v) = 3$.

Подсчитаем число f_1 пар вершин y, z на расстоянии 1 в графе Γ , где $y \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 1 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 2 \end{Bmatrix}$. С одной стороны, по лемме 1 имеем $[321] = -r_{14} + 11$, где $0 \leq r_{14} \leq 7$, поэтому $48 = 12(11 - 7) \leq f_1 \leq 12(11 - 0) = 132$. С другой стороны, по лемме 3 имеем $[311] = r_{31} - r_{32} + 2$, поэтому

$$\begin{aligned} 48 \leq f_1 &= - \sum_i (-r_{31}^i + r_{32}^i) + 96 \leq 132, \\ -36 &\leq \sum_i (-r_{31}^i + r_{32}^i) \leq 48, \\ -0,75 &\leq \sum_i (r_{31}^i + r_{32}^i)/48 \leq 1. \end{aligned}$$

Подсчитаем число f_2 пар вершин y, z на расстоянии 2 в графе Γ , где $y \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 1 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 2 \end{Bmatrix}$. С одной стороны, по лемме 1 имеем $33 \leq [322] \leq 44$, поэтому $396 \leq f_2 \leq 528$. С другой стороны, по лемме 3 имеем $[312] = -r_{29} + 40$, поэтому

$$\begin{aligned} 396 \leq f_2 &= - \sum_i r_{29}^i + 2160 \leq 528, \\ 1632 &\leq \sum_i r_{29}^i \leq 1764, \\ 34 &\leq \frac{1}{25} \sum_i r_{29}^i / 48 \leq 36,75. \end{aligned}$$

Подсчитаем число f_3 пар вершин y, z на расстоянии 2 в графе Γ , где $y \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 1 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 2 \end{Bmatrix}$. С одной стороны, по лемме 1 имеем $[323] = -r_{13} + 4$, где $r_{13} \leq 4$, поэтому $0 \leq f_3 \leq 192$. С другой стороны, по лемме 3 имеем $[313] = r_{29} - r_{31} + r_{32} - 30$, поэтому

$$\begin{aligned} 0 \leq f_3 &= \sum_i (r_{29}^i - r_{31}^i + r_{32}^i) - 1440 \leq 192, \\ 1440 &\leq \sum_i (r_{29}^i - r_{31}^i + r_{32}^i) \leq 1632, \\ 30 &\leq \sum_i (r_{29}^i - r_{31}^i + r_{32}^i)/48 \leq 34. \end{aligned}$$

Подсчитаем число g_2 пар вершин y, z на расстоянии 2 в графе Γ , где $y \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 3 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} u & v \\ 3 & 2 \end{Bmatrix}$. С одной стороны, по лемме 2 имеем $31 \leq [322] \leq 56$, поэтому $124 \leq g_2 \leq 224$. С другой стороны, по лемме 3 имеем $[332] = -r_{29} - r_{30} + r_{32} - r_{33} + 5$, поэтому

$$\begin{aligned} 124 &\leq - \sum_i (r_{29}^i + r_{30}^i - r_{32}^i + r_{33}^i) + 240 \leq 224, \\ 16 &\leq \sum_i (r_{29}^i + r_{30}^i - r_{32}^i + r_{33}^i) \leq 116, \end{aligned}$$

$$0,333 \leq \sum_i (r_{29}^i + r_{30}^i - r_{32}^i + r_{33}^i)/48 \leq 2,417$$

Противоречие с тем, что $28 \leq r_{29} \leq 40, 29 \leq r_{30} \leq 42, 0 \leq r_{32} \leq 12, 3 \leq r_{33} \leq 12$ и $28 + 29 - 12 + 3 = 48 \leq \sum_i (r_{29}^i + r_{30}^i - r_{32}^i + r_{33}^i)/48$.

Теорема доказана.

Литература

1. Brouwer, A.E. Distance-regular graphs / A. E. Brouwer, A. M. Cohen, A. Neumaier. – Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1989. – 495 p.
2. Koolen, J. Distance-regular graphs with diameter 3 and eigenvalue $a_2 - c_3$ / Q. Iqbal, J. H. Koolen, J. Park, M. U. Rehman // Linear Algebra Appl. – 2020. – № 587. – P. 271–290.
3. Makhnev, A. A. On distance-regular graphs of diameter 3 with eigenvalue 0 / I. N. Belousov, A. A. Makhnev // Math. Trudy (Novosibirsk). – 2022. – № 25:2. – P. 162–173.
4. Park, J. Shilla distance-regular graphs / J. H. Koolen, J. Park // Europ. J. Comb. – 2010. – № 31. – P. 2064–2073.
5. Makhnev, A. A. Q-polynomial graph with intersection array $\{60,45,8;1,12,50\}$ does not exist / V. Bitkina, A. Gutnova, A. A. Makhnev // Vestnik Perm. University. – 2023. – № 2(61). – P. 29–33.
6. Coolsaet, K. Using equality in the Krein conditions to prove nonexistence of certain distance-regular graphs / K. Coolsaet, A. Jurishich // J. Comb. Theory. Series, A. – 2008. – № 115. – P. 1086–1095.

¹Хайнаньский университет, г. Хэйкоу

²Институт математики и механики
имени Н.Н. Красовского УрО РАН

³Уральский государственный
горный университет

⁴Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Поступила в редакцию 08.11.2024

Особенности изучения методов защиты от СВЧ-излучения в курсе «Медицинская и биологическая физика»

В.А. БАННЫЙ¹, А.Л. КАЗУЩИК¹, Е.С. ПЕТРОВА¹, О.М. ДЕРЮЖКОВА^{1,2}

Рассмотрены методические аспекты преподавания в курсе «Медицинская и биологическая физика» действия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона на биологические объекты и возможные способы защиты от электромагнитных излучений. Показано, что радиопоглощающие материалы и электромагнитные экраны являются эффективным средством решения проблем электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности. Приведен пример лабораторной работы, разработанной в рамках данной тематики, уделяется внимание соответствию электромагнитного фона санитарно-эпидемиологическим нормам.

Ключевые слова: медицинская и биологическая физика, электромагнитное излучение, сверхвысокая частота, радиопоглощающий материал, электромагнитный фон, изотропная среда.

The methodological aspects of teaching the effects of superhigh-frequency electromagnetic radiation on biological objects and possible methods of protection against electromagnetic radiation in the course «Medical and biological physics» are considered. It is shown that radioabsorbing materials and electromagnetic shields are an effective means of solving problems of electromagnetic ecology and electromagnetic safety. An example of laboratory work developed within the framework of this topic is given, the attention is paid to the compliance of the electromagnetic background with sanitary and epidemiological standards.

Keywords: medical and biological physics, electromagnetic radiation, superhigh frequency, radioabsorbing material, electromagnetic background, isotropic medium.

Введение. Учебная дисциплина «Медицинская и биологическая физика» в комплексе со смежными курсами медицинского профиля, такими как функциональная диагностика, нормальная физиология и др., ставит перед собой задачи приобретения студентами компетенций, умений и практических навыков для формирования целостной картины влияния физических факторов окружающей среды на биологический организм и медицинские проявления таких воздействий.

Реальная взаимосвязь изучаемой дисциплины «Медицинская и биологическая физика» с задачами практической медицины позволяет осуществлять достаточно высокое стимулирование изучения учебного материала и обеспечивает мотивацию учебно-познавательной деятельности будущих врачей.

При изучении влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на живой организм проявляется тесная связь физических и биологических компонентов базовых понятий, без которых невозможна реализация профессиональных навыков будущих врачей [1]–[3]. Студенты преимущественно изучают теоретические сведения о возможном неблагоприятном влиянии ЭМИ сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона на живой организм. Во вводной части занятия обращается внимание на причинно-следственные связи физических воздействий на организм и возникающих в нем биологических откликов. А именно, данное излучение способно привести к развитию различных функциональных и органических нарушений со стороны нервной, эндокринной, сердечно-сосудистой, иммунной, кроветворной и других систем организма. ЭМИ могут усугублять уже имеющиеся хронические заболевания или служить фактором, способствующим возникновению заболеваний другой этиологии. Длительное и регулярное воздействие СВЧ-излучения на организм человека оказывает отрицательное влияние на мозг, сосуды, кровь, лимфатические узлы, зрение, провоцирует образование опухолей. Без обеспечения генетически безопасного уровня ЭМИ и при несоблюдении требований санитарно-гигиенических норм безопасности такая техника вредна для здоровья людей [4], [5].

Одним из средств защиты биологических объектов от негативного влияния СВЧ-излучения являются радиопоглощающие материалы (РПМ), которые позволяют обеспечить требования норм электромагнитной экологии.

Таким образом, изучение в курсе «Медицинская и биологическая физика» теоретических основ действия ЭМИ на биологические объекты, физических характеристик РПМ, методов защиты от ЭМИ является актуальной и практико-ориентированной задачей в процессе подготовки специалистов медицинского профиля, так как электромагнитные поля (ЭМП) окружают нас постоянно и являются неотъемлемой частью нашей жизни.

1. Основная часть. Целью рассматриваемой в этой статье лабораторной работы «Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне» является изучение студентами экранирования как способа защиты от ЭМИ и проведение измерительных работ с экранами из доступных материалов (в том числе радиопоглощающих).

В теоретической части лабораторной работы «Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне» студенты знакомятся с примерами потенциально опасных источников ЭМП и ЭМИ и предельно допустимыми уровнями их воздействия на биологический организм, изучают методики измерения ЭМИ, способы защиты объектов от негативного влияния ЭМИ СВЧ-диапазона, факторы, влияющие на эффективность поглощения ЭМИ (амплитуда, плотность потока энергии, частота, поляризация, спектральный состав), а также рассматривают примеры лечебно-профилактических мероприятий по защите от ЭМИ.

1.1 Радиопоглощающие материалы, поглощение энергии электромагнитной волны. Эффективный способ, который позволяет обеспечить требования электромагнитной экологии, снизить до приемлемого уровня естественные и искусственные помехи при работе радиоэлектронных систем, основан на применении экранирующих и радиопоглощающих материалов на основе полимерных композитов. В них используются различные типы связующего и функциональных наполнителей, отличающиеся по физико-химическим и структурным характеристикам, вплоть до уникальных (соли ретинила Шиффа, биополимеры (хитин), сегнетомагнетики, киральные микроэлементы, нанотрубки на основе фуллеренов и другие).

Согласно литературным данным [6]–[9], типовыми наполнителями РПМ являются:

- электропроводящие порошкообразные материалы;
- проводящие углеродные, металлические и металлоуглеродные волокна, углеткани, металлические нити, пластинки, полоски фольги, обрезки проволоки, сетки сложной формы, решетки, резонансные элементы в виде крестообразных диполей или замкнутых проводников (колец) и т. п.;
- металлизированные углеродные и полимерные волокна, ткани, пленки, макросферы;
- магнитные наполнители;
- дисперсные полупроводники;
- диэлектрики, в частности, легко поляризуемые органические вещества (соли ретинила Шиффа), биополимеры (хитин).

Основной задачей при разработке РПМ является оптимизация их конфигурации, размеров, состава и структуры для обеспечения требуемого коэффициента отражения ЭМИ в заданном диапазоне частот при минимальных толщине и массе материала [10], [11]. В общем случае снижение энергии электромагнитной волны (ЭМВ) обусловлено не только ее рассеянием в результате взаимодействия со структурными неоднородностями РПМ и гашением за счет интерференции при переотражениях на границах раздела сред. Оно вызвано, главным образом, поглощением электромагнитной энергии вследствие присущих РПМ диэлектрических и магнитных потерь, а также переходом ее в другие виды энергии, в частности, в тепловую.

Для того, чтобы РПМ эффективно поглощал и мало отражал ЭМВ в широком диапазоне частот и углов их падения, необходимо выполнить два условия:

- волновое сопротивление РПМ должно быть согласовано со «свободным пространством» так, чтобы на границе двух сред отражение было минимально, и падающая волна максимально проходила внутрь материала;
- энергия волны, прошедшей в материал, должна им поглотиться.

Способность материала поглощать ЭМИ зависит от его электрических и магнитных свойств. Наиболее информативными характеристиками реакции среды на воздействие внешнего ЭМП являются частотные дисперсии комплексных величин диэлектрической и магнитной проницаемостей $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$, $\mu(\omega) = \mu'(\omega) + i\mu''(\omega)$, а также тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь $tg\delta(\omega) = \varepsilon''(\omega)/\varepsilon'(\omega)$, $tg\delta_m(\omega) = \mu''(\omega)/\mu'(\omega)$ ($\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота; ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала; $tg\delta$ и $tg\delta_m$ – тангенсы углов диэлектрических и магнитных потерь).

Поглощение энергии ЭМВ, падающей на РПМ, обусловлено джоулевыми потерями, явлениями естественного ферромагнитного резонанса, вихревыми токами [4], [6], [11].

Отметим также, что экранирование ЭМИ основано на двух фундаментальных принципах: отражении и поглощении ЭМВ при переходе их из одной материальной среды в другую. Оба эти эффекта снижают энергию ЭМП, прошедшую через экран. Применение экранов в повседневной жизни не так эффективно, как увеличение расстояния между источником ЭМП и биообъектом.

1.2 Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне. Схема экспериментальной установки лабораторной работы «Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне» представлена на рисунке 1.

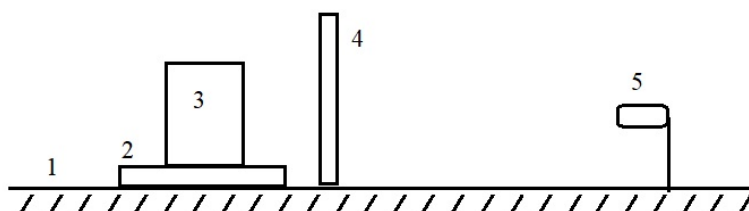


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для измерения интенсивности ЭМИ:
1 – лабораторный стол, 2 – поворотный диск, 3 – источник СВЧ-излучения, 4 – электромагнитный экран, 5 – измеритель уровня электромагнитного фона

На лабораторном столе размещаются источник ЭМИ на вращающемся диске с нанесенной шкалой угла поворота, держатель, с зафиксированным в нем измерителем уровня электромагнитного фона АТТ-2592, перемещаемый относительно источника ЭМИ по высоте и удалению, защитный электромагнитный экран [12]. На поверхность стола нанесена измерительная миллиметровая линейка.

Измеритель уровня электромагнитного фона АТТ-2592 является портативным прибором, предназначенным для безопасного измерения характеристик электромагнитного фона (поля) изотропным методом, снабжен 3-канальным датчиком, позволяющим проводить измерения одновременно по трем осям: X, Y, Z; измерение напряженности электрического поля в диапазонах 20 мВ/м...108 В/м и напряженности магнитного поля 53 мкА/м...286,4 мА/м; плотности потока энергии 0 мкВт/м²...30,93 Вт/м², отображение текущего, максимального, среднего и максимального среднего значения.

Изотропный (трехосный) зонд упрощает процедуру измерения, поскольку общее значение поля определяется с помощью трех измерений, выполненных без изменения положения датчика: это обусловлено геометрией устройства, которое состоит из трех независимых широкополосных чувствительных элементов, расположенных ортогонально друг другу. На практике мощность каждого элемента измеряется в течение трех последовательных временных интервалов, предполагающих, что компоненты ЭМП постоянны во времени.

В руководстве по эксплуатации к измерителям электромагнитного фона Актаком АТТ-2592 включены таблицы (СанПиН). Отметим, что для студентов медицинского профиля весьма важным является акцентирование внимания сравнения полученных результатов с санитарно-эпидемиологическими нормами, приводимыми в методической разработке к занятию (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Предельно допустимые уровни электрической напряженности и уровни плотности потока энергии в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия, Т, ч	Электрическая напряженность, диапазон частот 50 МГц – 300 МГц, ЕПДУ, В/м	Плотность потока, диапазон частот 300 МГц – 300 ГГц, ППЭ ПДУ, мкВт/см ²
8,0 и более	10	25
7,5	10	27
7,0	11	29
6,5	11	31
6,0	12	33
5,5	12	36
5,0	13	40
4,5	13	44
4,0	14	50
3,5	15	57
3,0	16	67
2,5	18	80
2,0	20	100
1,5	23	133
1,0	28	200
0,5	40	400
0,25	57	800
0,125 (для ЕПДУ), 0,2 (для ППЭ ПДУ) и менее	80	1000

Сравнивая показания прибора и табличные значения, студенты могут оценить время безопасного пребывания в месте, где находится источник ЭМИ.

В качестве источников СВЧ-излучения могут быть использованы сотовый телефон, СВЧ печь, персональный компьютер с Wi-Fi модулем. При использовании микроволновой печи из нее предварительно удаляется поворачивающийся столик, а в качестве нагрузки используется огнеупорный шамотный кирпич, устанавливаемый на неподвижную подставку. Передняя панель СВЧ печи является участком наиболее интенсивного излучения.

Узлы установки сменных защитных электромагнитных экранов обеспечивают их оперативную установку и замену. Сменные экраны имеют один типоразмер, но сформированы из различных полимерных композиционных материалов.

Данная лабораторная установка позволяет получить практические навыки измерения интенсивности ЭМИ СВЧ-диапазона, а также изучить методы защиты от радиоизлучения при работе с устройствами и аппаратами, содержащими СВЧ-генератор. Эксперименты позволяют определить зависимости плотности потока ЭМИ СВЧ-диапазона от расстояния до источника СВЧ волн и угла поворота, дать относительную оценку экранирующих свойств различных материалов.

Заключение. Таким образом, лабораторная работа «Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне», проводимая в рамках дисциплины «Медицинская и биологическая физика», позволяет обеспечить изучение и понимание студентами медицинского профиля актуальности защиты от ЭМИ на примере поглощающих экранов и сравнительной оценки полученных результатов с санитарно-эпидемиологическими нормами.

Литература

1. Банний, В. А. Оценка уровня электромагнитного фона и способы защиты от СВЧ-излучения : учеб.-метод. пособ. / В. А. Банний. – Гомель : ГомГМУ, 2015. – 62 с.
2. Банний, В. А. Оценка уровня электромагнитного фона в курсе «Медицинской и биологической физики» / В. А. Банний, Е. С. Петрова, О. М. Дерюжкова // Актуальные вопросы научно-методической и учебно-организационной работы : традиционные ценности и инновационные технологии в образовании как фактор прогрессивного развития общества : сб. науч. ст. Респуб. науч.-метод. конф., Гомель, 22–23 февраля 2024 г. / ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, 2024. – С. 138–141.

3. Оценка параметров импульсных сигналов, применяемых в электростимуляции, с использованием новой экспериментальной установки в курсе медицинской и биологической физики / А. Л. Казушик [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. – 2021. – № 18 (3). – С. 80–85.
4. Макаревич, А. В. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ / А. В. Макаревич, В. А. Банний // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 24–32.
5. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев [и др.]. – СПб. : НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
6. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.
7. Поглотители СВЧ излучения на основе гофрированных композитов с углеродными волокнами / Д. С. Быченко [и др.] // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 12. – С. 124–128.
8. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур / Цянь Сонгсонг [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4 (21). – С. 40–45.
9. Поглотители энергии электромагнитного излучения оптического и СВЧ диапазонов на основе полимерных композитов / В. А. Банний [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 64–68.
10. Влияние размерных и рецептурных параметров полимерных композитов на их радиофизические характеристики / В. А. Банний [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2000. – Т. 44, № 4. – С. 109–111.
11. Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным композитным электромагнитным экраном : физические модели и эксперимент / В. А. Банний [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – № 2. – С. 45–51.
12. Банний, В. А. Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне в курсе «Медицинская и биологическая физика» / В. А. Банний, Е. С. Петрова, О. М. Дерюжкова // Актуальные проблемы медицины : сб. науч. ст. Респуб. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Гомель, 13 ноября 2024 г. / ГГМУ. – Гомель, 2024. – Вып. 25, т. 2. – С. 86–88.

¹Гомельский государственный
медицинский университет

²Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 27.03.2025

Электроника

УДК 621.389

EDN: TFWBKU

Практикум по основам радиоэлектроники для обучающихся инженерно-технического профиля с использованием современных средств виртуализации

Е.Б. ШЕРШНЕВ

В статье представлена апробированная методика преподавания основ электронной техники и радиоэлектроники для студентов инженерно-технического профиля факультета физики и информационных технологий. В представленной методике активно применяется виртуальная платформа моделирования и изучения схем радиоэлектронных узлов и приборов. Виртуальные платформы и технологии позволяют получать знания и навыки в интерактивной и более доступной форме, но не могут полностью заменить реальный опыт работы с оборудованием. Это особенно актуально для специальностей инженерно-технического профиля, когда важно уметь работать с реальными инструментами и материалами. Современные виртуальные практикумы предоставляют теоретические знания, поэтому должны быть закреплены практическими навыками в процессе работы с реальными объектами.

Ключевые слова: радиоэлектроника, лабораторный практикум, виртуальные платформы.

The article presents a proven methodology of teaching radio electronics for students of engineering and technical profile of the Faculty of Physics and Information Technology. In the presented methodology, a virtual platform for modelling and studying circuits of radio-electronic components and devices is actively used. Virtual platforms and technologies allow you to gain knowledge and skills in an interactive and more accessible way, but they cannot completely replace the real experience of working with equipment. This is especially true for engineering specialties, when it is important to be able to work with real tools and materials. Modern virtual workshops provide theoretical knowledge, so they should be consolidated with practical skills in the process of working with real objects.

Keywords: radio electronics, laboratory workshop, virtual platforms.

Введение. Развитие информационно-коммуникационных технологий диктует в современном мире и обществе условия, при которых они непосредственным образом влияют на человеческую жизнь, и, как следствие, на образовательный процесс. Многие образовательные курсы переходят на виртуальные платформы, внедряются виртуальные лекции и практикумы, что влечет за собой определенные проблемы в сфере подготовки специалистов [1], [2]. Одной из таких проблем является невозможность переноса полученных навыков и умений в виртуальной системе на реальное оборудование.

Проблемой является адаптация к новым условиям работы. Виртуальные лекции и практикумы требуют от студентов и преподавателей новых навыков и подходов к обучению. Преподаватели должны уметь использовать новые технологии, а студенты должны быть готовы к работе в виртуальной среде. Это требует времени и усилий для адаптации, что может привести к снижению эффективности образовательного процесса.

Кроме того, виртуальные платформы могут создавать иллюзию знаний, когда студенты могут получить высокие оценки за выполнение виртуальных заданий, не имея при этом реальных навыков и знаний. Это может привести к снижению качества подготовки специалистов и увеличению числа выпускников, которые не готовы к реальной работе.

Для решения этих проблем необходимо разработать новые подходы к обучению, которые будут сочетать в себе элементы виртуальных и реальных технологий. Важно, чтобы студенты получали не только теоретические знания, но и практические навыки, которые можно перенести на реальное оборудование. Для этого необходимо разрабатывать новые программы обучения, которые будут включать в себя как виртуальные, так и реальные компоненты.

Как правило, одним из важнейших видов учебных занятий в системе вузовской подготовки специалистов являются лабораторные работы. Лабораторный практикум – это наиболее значимый и результативный компонент общей профессиональной и специальной подготовки в области любой общенаучной и технической дисциплины, предназначенный для приобретения навыков работы на реальном оборудовании.

На лабораторный практикум возлагаются следующие задачи [3]:

- практическое закрепление полученных теоретических знаний и приобретение навыков самостоятельной работы с реальным оборудованием;
- планирование и постановка эксперимента. Выбор оборудования для его проведения, обработка и объяснение результатов;
- сопоставление результатов теоретического анализа с экспериментальными данными.

К перечисленным умениям необходимо добавить умение правильно «читать» и составлять простейшие электрические цепи по предложенной схеме, налаживать и регулировать их.

С внедрением информационных технологий в образовательный процесс становится возможным значительное повышение качественного уровня проведения лабораторных работ, не ограничиваясь полным переносом лабораторного практикума в виртуальное пространство. Использование информационных технологий позволяет эффективно дополнить существующие методы проведения лабораторных работ, расширяя возможности студентов и преподавателей.

Работа с программным обеспечением стимулирует исследовательскую и творческую деятельность студентов. Это особенно важно в современных условиях, когда требуются специалисты, способные решать сложные задачи и находить нестандартные подходы к решению проблем. Перенос полученных результатов работы на реальное оборудование позволяет закрепить теоретические знания на практике, что значительно повышает уровень подготовки специалистов [1]–[3].

Кроме того, использование информационных технологий в лабораторном практикуме способствует развитию навыков работы с современным оборудованием и программным обеспечением, что является важным аспектом подготовки инженеров. Это также позволяет более эффективно использовать учебное время, предоставляя обучающимся возможность самостоятельно исследовать и экспериментировать, что способствует более глубокому пониманию материала.

Таким образом, внедрение информационных технологий в образовательный процесс является важным шагом на пути к повышению качества образования. Оно позволяет не только улучшить традиционные методы проведения лабораторных работ, но и создать новые возможности для студентов, способствуя их более глубокому и всестороннему развитию. Созданный методический комплекс позволит повысить качество образовательного процесса при проведении лабораторных работ.

Методика проведения лабораторного практикума по основам радиоэлектроники.

Все лабораторные работы выполняются по следующей схеме [3]:

- теоретическое освоение материала;
- допуск к выполнению лабораторной работы (устно или тест);
- проектирование электронной схемы, настройка и исследование ее на компьютере;
- обработка результатов на компьютере;
- проектирование электронной схемы на лабораторной установке и ее исследование;
- обработка результатов;
- сравнение результатов (если это необходимо);
- защита отчёта по лабораторной работе.

Таким образом, лабораторный комплекс представляет собой связку виртуального эксперимента (моделирование и исследование электронной схемы на персональном компьютере) и эксперимента на реальном оборудовании.

Рассмотрим пример проведения лабораторной работы по курсу «Основы радиоэлектроники» с применением виртуальной среды проектирование электронных схем и устройств «Electronics Workbench» (либо аналогов) и универсального лабораторного стенда, разработанного в лаборатории электроники кафедры общей физики.

Конструкция лабораторного стенда представлена на рисунке 1.

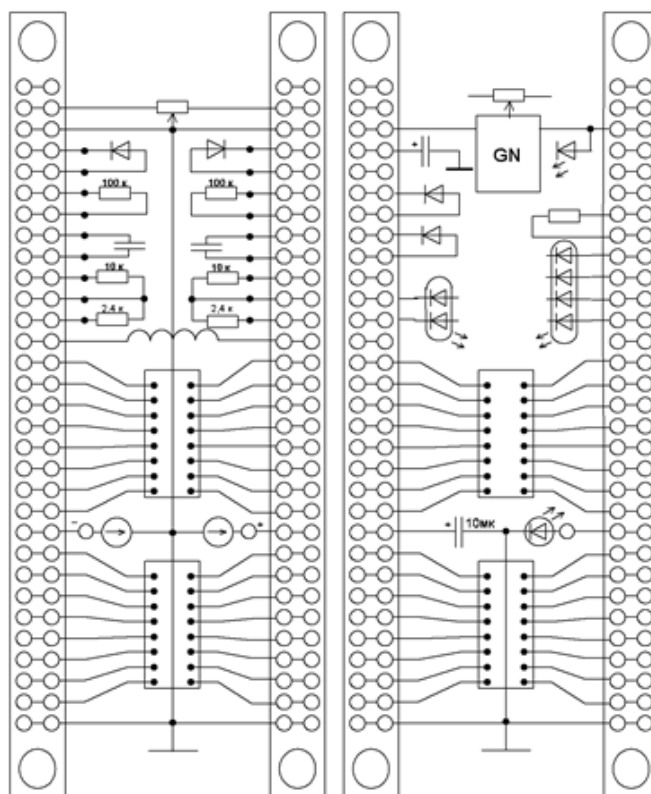
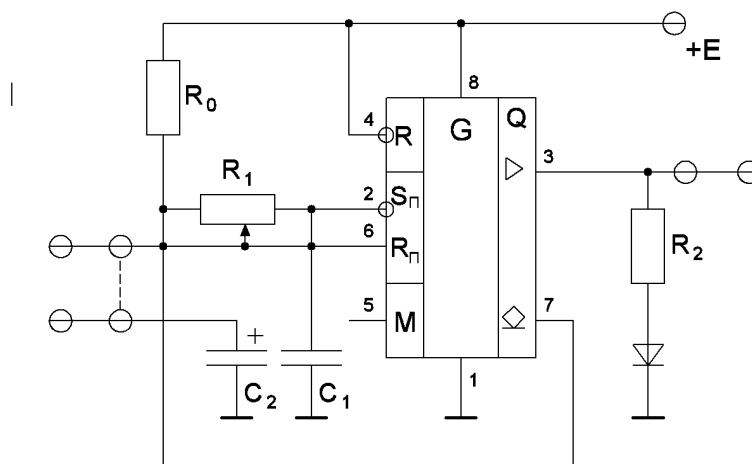


Рисунок 1 – Внешний вид конструкции лабораторного стенда

Структура лабораторного стенда представлена в виде установленных пассивных элементов, индикаторных светодиодов, панелей для установки транзисторов и микросхем, коммутационных полей и соединительных проводов, с помощью которых можно собрать любую из предлагаемых для исследования схем. Номиналы пассивных элементов стенда подобраны таким образом, чтобы при работе с любой схемой получить оптимальные результаты как измерений, так и осциллограмм, а также обеспечить максимально долгую работу стенда при возможных ошибках студентов в процессе выполнения лабораторной работы. Выводы каждого элемента выведены на два гнезда стандартных разъемов, как показано на рисунке 1.

Генератор тактовых импульсов выполнен на базе прецизионного таймера К1006ВИ1 (иностранный аналог NE555N) по схеме, обеспечивающей постоянство заданной частоты при изменениях напряжения питания в пределах 4–12 В. Базовая схема генератора приведена на рисунке 2:



$$R_0 = 680 \text{ Ом}, R_1 = 47 \text{ кОм}, R_2 = 16 \text{ кОм}, C_1 = 470 \text{ нФ}$$

Рисунок 2 – Схема генератора тактовых импульсов

При указанных номиналах элементов частоту генератора можно изменять резистором R_1 в необходимых пределах, при этом скважность сигнала $Q \approx 2$.

При подключении параллельно конденсатору C_1 внешнего конденсатора C_2 большой емкости (47 мкФ) частота генератора уменьшается и контролируется светодиодным индикатором, подключенным к выходу генератора.

Данная схема генератора обладает высокой стабильностью временных параметров при изменении напряжения питания в пределах от 3 до 15 В.

В качестве индикаторов логической «1» использованы светодиоды повышенной яркости желтого цвета свечения с токоограничивающими резисторами (рисунок 3).

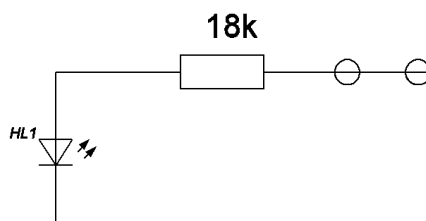


Рисунок 3 – Схема индикатора логической «1» (всего – 4)

В качестве индикаторов логической «0» использованы светодиоды повышенной яркости зеленого цвета свечения с токоограничивающими резисторами (рисунок 4).

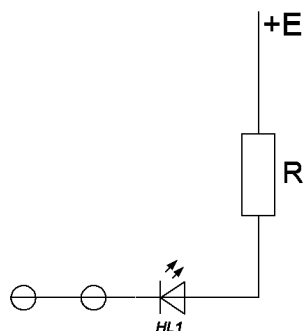


Рисунок 4 – Схема индикатора логического «0» (всего – 2)

Для установки микросхем используются специализированные панельки, выводы от которых выведены на коммутационные разъемы. Сборка схем осуществляется с помощью проводов с соответствующими наконечниками, подходящими по конструктивным размерам к гнездам разъемов. Напряжение питания стенда подается от внешнего лабораторного источника и контролируется с помощью светодиодных индикаторов разного цвета – $-E$ – зеленый, $+E$ – красный. Такая конструкция универсального лабораторного стенда делает его самодостаточным, легко тиражируемым.

Среда схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» включает инструменты для моделирования, редактирования, анализа и тестирования электрических схем. Программа имеет простой интерфейс и идеально подходит для обучения электронике. Библиотеки предлагают огромный набор моделей радиоэлектронных устройств с широким диапазоном значений параметров. Кроме этого, есть возможность дополнения электронных компонентов. Активные элементы могут быть показаны как идеальными, так и реальными моделями. Всевозможные приборы (мультиметры, осциллографы, вольтметры, амперметры, частотные графопостроители, динамики, светодиоды, лампы накаливания, логические анализаторы, сегментные индикаторы) позволяют делать измерения любых электрических величин, а также строить графики. Может производить анализ цепей по постоянному и переменному току, исследовать переходные процессы при любом внешнем воздействии с помощью генераторов сигнала разной формы.

Структура и методика проведения лабораторной работы «Операционные усилители».

Рассмотрим пример проведения лабораторной работы с применением вышеописанной методики.

Цель работы состоит из трёх составляющих:

1. Изучить принцип действия инвертирующего усилителя, построенного на базе операционного усилителя (далее – ОУ).
2. Измерить коэффициент усиления инвертирующего усилителя.
3. Определение разности фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ.

Приборы и оборудование: генератор сигналов, осциллограф, микросхема операционного усилителя, резисторы различных номиналов, соединительные провода, персональный компьютер с установленной программой Electronics Workbench.

Задание 1. Произвести моделирование инвертирующего усилителя на базе УО на персональном компьютере с среды виртуализации Electronics Workbench (рисунок 5).

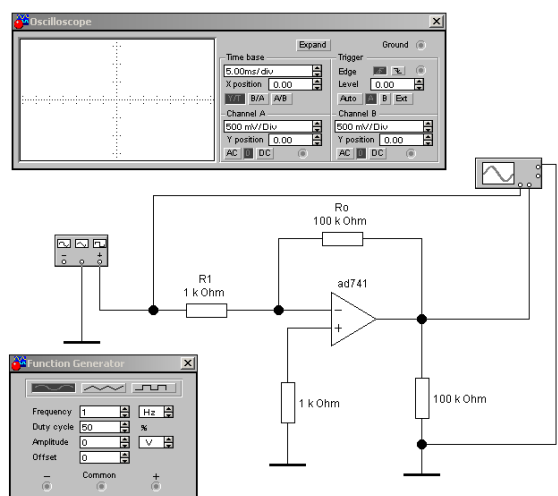


Рисунок 5 – Внешний вид схемы инвертирующего усилителя, построенного на базе ОУ в программе Electronics Workbench

Проверить правильность и работоспособность схемы в соответствие с теоретическим материалом лекций.

Задание 1.1. Работа усилителя в режиме усиления синусоидального напряжения.

Рассчитайте коэффициент усиления напряжения K_y усилителя по значениям параметров компонентов схемы.

Измерьте амплитуду входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ синусоидального напряжения, постоянную составляющую выходного напряжения.

Измерьте разность фаз между входным и выходным напряжением.

По результатам измерений вычислите коэффициент усиления по напряжению K_y усилителя.

$$K_y = -(R_0 / R_1) \quad (1)$$

Знак «минус» в формуле означает, что выходное напряжение инвертирующего усилителя находится в противофазе с входным напряжением.

Задание 1.2 Исследование влияния параметров схемы на режим её работы.

Установите значение сопротивления R_1 равным 10 кОм, амплитуду синусоидального напряжения генератора: 100 мВ.

Установите масштаб напряжения на входе А осциллографа 100 мВ/div, а на канале В – 500 мВ/div.

Для новых параметров схемы повторите все измерения и вычисления задания 1.1.

Задание 2. Исследование инвертирующего усилителя на реальном ОУ с помощью лабораторного стенда.

Задание 2.1. Работа усилителя в режиме усиления синусоидального напряжения.

Собрать схему, приведенную на рисунке 6.

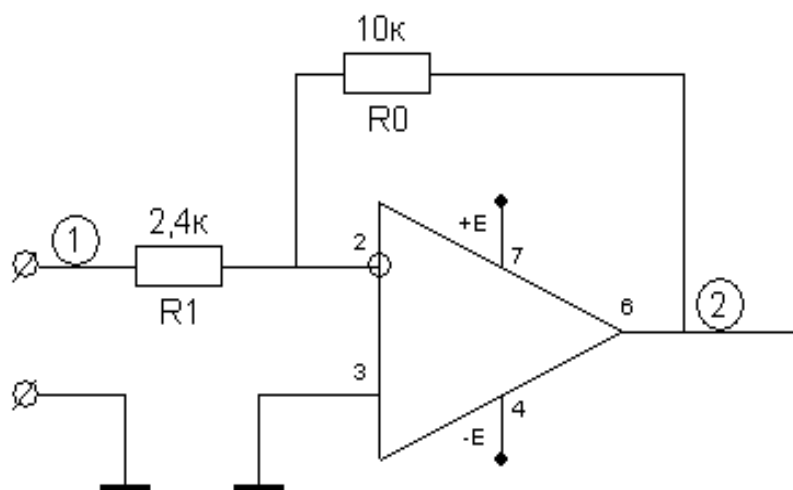


Рисунок 6 – Схема инвертирующего масштабного усилителя

Рассчитайте коэффициент усиления напряжения K_y усилителя по значениям параметров компонентов схемы.

Ко входу подключить генератор синусоидального сигнала (размах сигнала – 1В установить с помощью осциллографа, точка 1).

Измерьте амплитуду входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ синусоидального напряжения, постоянную составляющую выходного напряжения, с помощью осциллографа.

Измерьте разность фаз между входным и выходным напряжением.

По результатам измерений вычислите коэффициент усиления по напряжению K_y усилителя по формуле (1).

Измерить размах сигнала на выходе операционного усилителя (осциллограф в режиме внешней синхронизации, точка 1) и определить его фазу

Определить коэффициент усиления (с учетом знака фазы) $K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$.

Сравнить полученное значение с расчетным.

Задание 2.2. Исследование влияния параметров схемы на режим её работы.

Установите значение сопротивления R_1 равным 10 кОм, амплитуду синусоидального напряжения генератора – 100 мВ.

Установите масштаб напряжения на первом канале осциллографа 100 мВ/div, а на втором канале 500 мВ/div.

Для новых параметров схемы повторите все измерения и вычисления задания 2.1.

Защита отчёта по лабораторной работе также подразумевает ответ обучаемого на контрольные вопросы:

1. Как рассчитать коэффициент усиления схемы инвертирующего усилителя на базе ОУ?
2. Каким образом измерить разность фаз между входным и выходным напряжением в схеме инвертирующего усилителя?
3. Оцените различия между измеренным и вычисленным коэффициентом усиления в задании 1 и задании 2.

5. Какие параметры схемы инвертирующего усилителя влияют на ее коэффициент усиления?

Заключение. Таким образом, предложенная методика проведения лабораторного практикума не только позволяет обучаемым избежать ошибок при проведении исследований и проектировании электронных приборов и устройств, но и обучает их современным методам исследования и проектирования электронных устройств на персональном компьютере. Это способствует развитию у студентов навыков работы с программным обеспечением, используемым в инженерной деятельности, и готовит их к реальным условиям работы.

В результате применения предложенной методики обучающиеся не только получают необходимые знания и навыки, но и развивают критическое мышление, способность к анали-

зу и решению проблем. Это позволяет им стать более конкурентоспособными на рынке труда и готовыми к решению сложных инженерных задач. Таким образом, предложенная методика проведения лабораторного практикума является эффективным инструментом для подготовки высококвалифицированных специалистов в области электроники и электротехники.

Литература

1. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи : учебно-методическое пособие / сост. И. Л. Дудников, И. П. Матвеев. – Минск : БГАТУ 2005. – 139 с.
2. Бобровников, Л. З. Электроника : учебник для вузов / Л. З. Бобровников – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
3. Теоретические основы электротехники в экспериментах и упражнениях. Практикум в среде Electronics Workbench : учебное пособие / Е. О. Кулешова, В. А. Колчанова, В. Д. Эськов, С. В. Пустынников ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 140 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 24.03.2025

Особенности полировки алмазов в различных кристаллографических плоскостях для изделий микроэлектроники специального назначения

Е.Б. ШЕРШНЕВ, А.Н. КУПО

В статье представлены результаты исследования поверхности алмазных компонентов электронных приборов, полученные методом механической полировки. Выявлены особенности механической обработки указанных поверхностей в различных кристаллографических направлениях. Представлены результаты экспериментального исследования методом электронной и атомно-силовой микроскопии. Показано, что частицы, появляющиеся при полировке природных алмазов в направлении [100] на поверхности (100) состоят из менее плотных форм углеродных кластеров. Кроме того показано, что при полировке природных алмазов в «мягких» направлениях происходит процесс трансформации алмаза в менее плотные фазы углерода, после чего трансформированный материал сравнительно легко отделяется, при этом скорость обработки возрастает в 3–4 раза. Сформулированы предложения по выбору обрабатывающего инструмента и методикам полировки готовых изделий.

Ключевые слова: изделия микроэлектроники, износ алмаза трением, кристаллографические плоскости и направления.

The article presents the results of the study of the surface of diamond components of electronic devices obtained by mechanical polishing. The features of mechanical treatment of these surfaces in various crystallographic directions are revealed. The results of an experimental study by electron and atomic force microscopy are presented. It has been shown that the particles that appear when polishing natural diamonds in the direction of [100] on the surface (100) consist of less dense forms of carbon clusters. In addition, it is shown that when polishing natural diamonds in «soft» directions, the process of transformation of the diamond into less dense phases of carbon occurs, after which the transformed material is relatively easy to separate, while the processing speed increases by 3–4 times. The proposals are formulated for the choice of machining tools and methods of polishing finished products.

Keywords: microelectronics products, diamond wear by friction, crystallographic planes and directions.

Введение. Алмаз используется в качестве теплоотводящих оснований для изделий высокотемпературной электронной техники, применяется в изделиях специальной электроники, преобразователей УФ-излучения в системах космического видеонаблюдения, подложек для эпитаксиального наращивания полупроводниковых монокристаллических слоев для СВЧ-транзисторов, оптических окон для источников мощного излучения, звукопроводов акусто-электронных устройств [1]–[7]. Разработка и внедрение высокоэффективной технологии и оборудования для обработки алмазов в производстве компонентов электронной техники требуют высокого качества механической обработки (например, производственной шлифовки и полировки), изучения закономерностей влияния изотропии и анизотропии модификаций углерода (в частности, алмаз и графит) на эти процессы. Методом плоского шлифования и полирования поверхности в том числе изготавливаются следующие виды инструмента: иглы в виде четырехгранной пирамиды для правки абразивных кругов; резцы для скрайбирования; наконечник пирамидальный для определения микротвердости и прочих технологический инструмент из алмаза в производстве электронных компонент.

Алмаз является наиболее твердым из известных материалов, и его обработка производится уникальными методами с использованием специального оборудования. Традиционно он обрабатывается на чугунной планшайбе (диск, диаметром 300 мм), на которой сформированы зоны для шлифовки и полировки сырья из различных зерновых фракций алмазного порошка. Общий вид установки и алмазного диска представлены на рисунке 1 [8].



Рисунок 1 – Общий вид установки для обработки плоских поверхностей (а) и алмазного диска (б)

Диск вращается с частотой 50–65 Гц. Относительная скорость диска и алмазного образца составляет величину порядка 30 м/с. Линейные размеры фракций алмазного порошка могут варьироваться в достаточно широких пределах от 1 мкм до 50 мкм.

На установке применяется устройство (см. рисунок 2), позволяющее использовать рычаг баланса 1 для уменьшения трения вокруг горизонтальной оси алмазного диска 2 при обработке за счет изменения давления на алмаз. Это устройство 3 закреплено на окончании рычага, которое осуществляет вращательное движение посредством электродвигателя 4 при обработке с максимальной угловой скоростью 1600 рад/с.

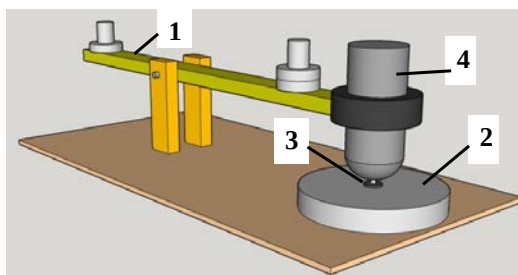


Рисунок 2 – Общая схема шлифующего устройства

Принципиальная особенность полировки природных алмазов – высокая анизотропия величины износа: она может достигать двух порядков в зависимости от ориентации кристаллографических плоскостей при полировке. Для оценки износа определена зависимость изменения массы природных алмазов от времени обработки. Алмаз шлифовался вдоль основных поверхностей, но угол азимута направлений полировки менялся. Механизм полировки интерпретировался в рамках процесса микрослоистости, и показал зависимость величины съёма материала от кристаллографической ориентации относительно полируемой поверхности. Как известно, алмаз легко раскалывается вдоль по плоскости (111) [9], поэтому можно сделать вывод, что отслаивание на микроуровне преимущественно происходит вдоль этой поверхности. В соответствии с такой моделью в некоторых направлениях алмаз шлифуется более эффективно.

Современные исследования полированных поверхностей показывают, что механизм полировки в разных кристаллографических направлениях не объясняется только в рамках процесса микрослоистости. Микрорельеф поверхности, полируемой в направлении [111] принципиально отличается от той, что полируется в направлении [100].

Целью представленного в данной статье исследования было изучение следов износа на взаимодействующих плоскостях. Исследования проводились посредством атомно-силовой микроскопии (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Анализ состава микрочастиц износа дает информацию о термохимических изменениях материала. Если в микрочастицах найдены формы углерода, отличные от исходного материала, следует выяснить, является трансформация частью процесса износа или она происходит после того, как материал отделится от поверхности.

Объекты и методика исследования. Различия в химическом составе двух видов алмазных микрочастиц, появляющихся в процессе обработки, важна по следующей причине: если происходит динамическая трансформация, то графит или другие формы углерода следует искать и в микрочастицах как алмазного порошка диска, так и в образца, т. к. в точке

контакта термодинамические условия одинаковы. Но если имеет место только механический процесс, существует возможность, что алмазный порошок не изнашивается также быстро, как и образец (при полировке в «мягком» направлении $[100]$ параллельно грани (110)), т. к. частицы порошка двигаются хаотично в точке контакта. Таким образом, менее вероятно, что алмазный порошок превратится в графит или другую форму углерода.

Эксперимент заключался в смазке шлифовального диска порошком с высоким содержанием азота и полировке природных алмазов типа Ia в относительно «твёрдом» направлении $[110]$ параллельно грани (100) . Это было сделано и потому, что количество микроосколков износа, произведенных за определенное время, было намного меньше, чем при полировке в «мягком» направлении (таким образом, уменьшая количество материала, которое могло осесть на диске), и потому, что более «твёрдое» направление в большей мере противостоит частицам порошка на диске, заставляя их быстрее отделяться. Полировка продолжалась до тех пор, пока пыль не была абсорбирована порами диска. На рабочие поверхности диска был нанесён алмазный порошок с высоким содержанием азота.

Процесс изнашивания цилиндрических и конических поверхностей (см. рисунок 3) [8] на монокристаллах искусственного алмаза имеет отличительные особенности по сравнению с процессом изнашивания его плоских поверхностей. Это, прежде всего, наличие на обрабатываемой поверхности кристаллографических плоскостей с различными физико-механическими свойствами. Кроме того, если при изнашивании плоских поверхностей искусственного алмаза необходимо получение шероховатости высокого класса, то для цилиндрических достаточно обеспечить шероховатость поверхности $R_a = 0,6 - 1,25$ мкм.



Рисунок 3 – Общий вид установки для обработки цилиндрических и конических поверхностей

Исследования взаимодействия алмазного инструмента с монокристаллом синтетического алмаза показали, что на контролируемых поверхностях обрабатываемого кристалла и алмазного инструмента под действием приложенной нагрузки возникают контактные напряжения и, если их значения превышают прочность алмаза, происходит его разрушение, т. е. изнашивание.

При этом следует учитывать, что вероятность разрушения хрупких кристаллических тел в том или ином направлении определяется наиболее благоприятным сочетанием плотности их кристаллографических сеток, межплоскостного расстояния и количества разрываемых межатомных связей на единицу поперечного сечения.

Исследовался механизм износа искусственного алмаза при шлифовании различным алмазным инструментом.

Объектами исследования служили монокристаллы искусственного алмаза. В качестве инструмента применяли алмазные круги диаметром 250 мм на металлической (система Cu-Sn) и органической связках. Размер зерен алмазного синтетического порошка составлял 63–40 мкм, 80–63 мкм. Режимы обработки – линейная скорость шлифования 1–2 м/с, ток травления для кругов на металлической связке 2,0–3,0 А для заготовок диаметром 3–4,5 мм. Для сравнения морфологии обрабатываемых поверхностей осуществляли шлифование инструментом на металлической связке (Cu-Sn) с электрохимическим восстановлением (растворением) профиля. После обработок исследовали морфологию поверхности монокристалла искусственного алмаза инструментом на металлической связке (максимальная скорость рас-

творения 160–170 мкм/час, зерно АС-6, 80–63 мкм). Морфология поверхности представляет собой рельеф из параллельно расположенных углублений (царапин) длиной 1–3 мм, глубиной 15–30 мкм, шириной 7–40 мкм. Микрорельеф такой поверхности представлен кратерами размерами 8–2 мкм, глубиной 1–4 мкм. При снижении интенсивности растворения металлической связи происходит изменение морфологии поверхности кристалла: грубый, глубокий рельеф сглаживается. На фоне сглаженного рельефа появляются острые царапины, узкие в начале и расширяющиеся затем с образованием углубления (кратера).

Механизмы изнашивания поверхности алмаза в различных кристаллографических плоскостях. Как было указано ранее, анизотропия свойств синтетических и природных алмазов, проявляющаяся, в частности, в зависимости микромеханических свойств от выбранного направления обработки влияет на износ материал в конкретных кристаллографических направлениях.

На поверхности (100), полированной в направлении [100], появляются выемки, и это значит, что механизм устранения материала является кластерным, как показано на рисунке 4.

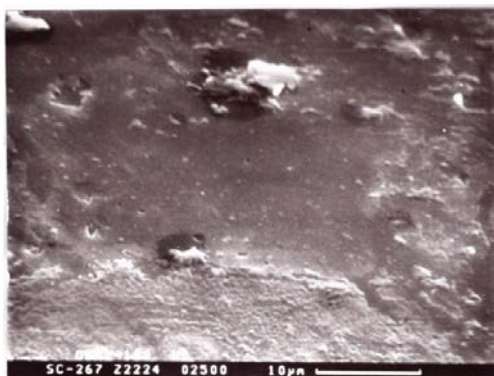


Рисунок 4 – Изображение поверхности, отполированной в направлении [100], полученное методом РЭМ

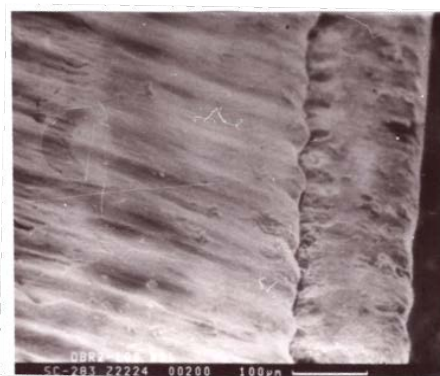


Рисунок 5 – Изображение поверхности отполированной в направлении [110], полученное методом РЭМ

На поверхности, отполированной в направлении [110], наблюдаются гладкие желобки, часто без излома (см. рисунок 5). Это объясняется преобладанием механизма микрослоистости, характерного для направления [111], но этот процесс не единственный, и поэтому, может быть предложен процесс разрыва связей между атомами, возникающий из-за высокого давления, созданного на поверхности.

Следует учитывать также химический износ, включающий образование графита и других аллотропных форм углерода, который происходит на поверхности природных алмазов при полировке, и ведет к удалению материала. В зависимости от скорости относительного перемещения, наряду с описанными механизмами износа, оказывают влияние и термохимические.

При анализе частиц износа в опытах трения обнаружены частицы, представляющие собой различные аллотропные модификации углерода, что однозначно указывает на высокую вероятность фазовых переходов при полировке.

Другая модель механической полировки предполагает термохимический износ, где происходит карбонизация или сгорание при повышении температуры в отдельных точках.

В этой модели полагается, что количество теплоты Q , сообщаемое поверхностному слою в течении времени обработки τ , согласно закону Джоуля, является реализацией работы силы трения.

$$Q(t) = A_{mp} = \mu \cdot N \cdot S = \mu \cdot N \cdot v \cdot t, \quad (1)$$

где: μ – коэффициент трения, N – сила нормальной реакции опоры, эквивалентная нагрузке на шлифованный диск, v – линейная скорость относительного вращения.

При этом тепловая энергия уводится в объем материала по механизму теплопроводности, согласно закону Фурье (рассматривается одномерный случай).

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial \tau} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T(x,t))) = \frac{Q(t)}{\sigma}, \quad (2)$$

где: T – термодинамическая температура, x – координата, вдоль которой распространяется тепловая энергия, σ – площадь обрабатываемой поверхности, ρ – плотность материала, c – теплоёмкость, λ – теплопроводность.

Теоретическая модель, основанная на термохимическом механизме и представляющая собой решение дифференциального уравнения в форме (1), в случае граничных условий второго рода, предсказывает показательную (экспоненциальную) зависимость величины износа (Δm) от скорости относительного перемещения. Однако эксперимент показывает [9], что величина износа прямо пропорциональна скорости, при этом коэффициент трения μ зависит от выбора кристаллографического направления [9]. Поэтому можно полагать, учитывая высокую температуропроводность алмаза, что износ материала происходит по линейному закону, согласно уравнению (3):

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot c \cdot (T_{\phi n} - T) + L \cdot \frac{dm}{dt} = \mu \cdot N \cdot v \quad (3)$$

откуда:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\mu \cdot N}{c \cdot (T_{\phi n} - T) + L} \cdot v. \quad (4)$$

Где: $\frac{dm}{dt}$ – величина износа, $T_{\phi n}$ – температура фазового перехода (графитизации или плавления), L – удельная теплота фазового перехода. Представленная теоретическая зависимость (4) имеет графическую интерпретацию, показанную на рисунке 6.

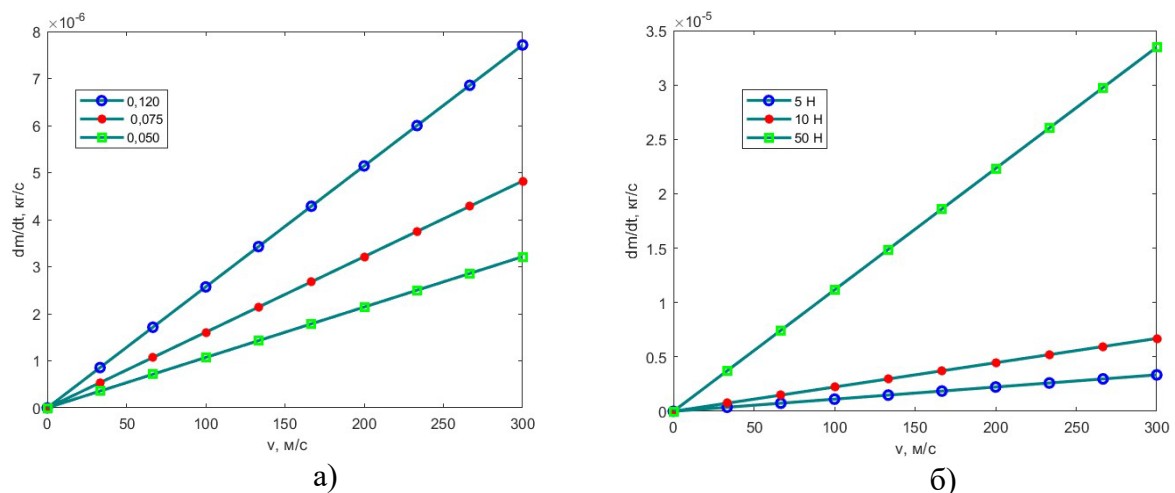


Рисунок 6 – Зависимости износа (кг/с) от скорости v (м/с) в случае обработки в различных кристаллографических направлениях (а) и при различной нагрузке (б)

При этом коэффициент трения μ зависит от выбранной грани и направления обработки и варьируется в пределах от 0,12 до 0,05.

Таким образом, удаление материала вызывает химический и механический процессы. Они могут работать одновременно, в зависимости от поверхности и направления полировки.

Обсуждение результатов исследования поверхности алмазов после обработки. Анализ морфологии поверхности инструмента (см. рисунок 7) показывает, что при скоростях растворения металлической связки 120–140 мкм/час поверхность приобретает грубый рельеф.

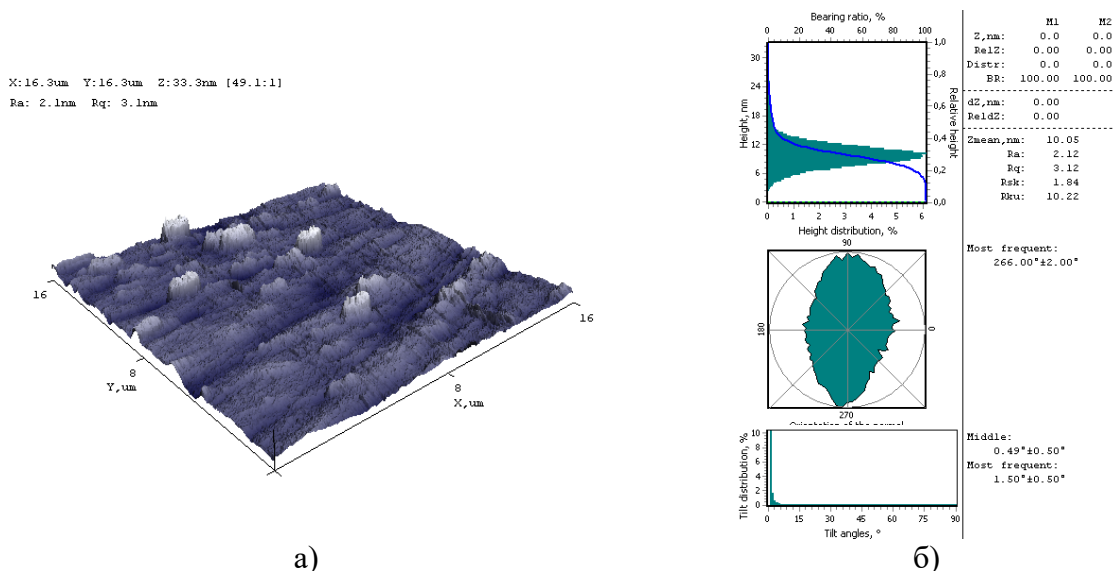


Рисунок 7 – Результаты АСМ исследования поверхности инструмента: а – морфология поверхности; б – статистические характеристики нанорельефа

Глубина впадин достигает 100–200 нм. Растворение поверхности сплава неравномерное. Алмазные зерна имеют площадки износа, на поверхности связки имеются углубления (отпечатки) от выкрошившихся зерен. При снижении скорости растворения (30–50 мкм/час) рельеф поверхности связки не меняется. Отпечатков выкрошившихся зерен больше. На зернах, выступающих из связки, имеются площадки износа.

Анализ морфологии поверхности кристалла (см. рисунок 8), обработанного инструментом на органической связке с тем же размером зерен алмазного синтетического порошка, показывает, что рельеф поверхности выражен в меньшей степени. Углубления (царапины) на поверхности кристалла менее глубокие, можно идентифицировать отдельные из них. При повышенных скоростях растворения связки отдельные царапины имеют узкое начало, а заканчиваются углублением. Микрорельеф представлен углублениями размером 102 нм с четко выраженным рельефом. Морфология поверхности алмазoабразивной композиции гладкая, однородная, глубина микрорельефа составляет 3–10 нм. Зерна алмаза имеют, как правило, острые вершины. Наряду с зернами в связке имеются углубления, заполненные несколькими кристаллами (алмаза). Продукты износа состоят из частиц фракции 40–20 мкм (5–10 %), частиц фракции 20–13 мкм (20–30 %), частиц фракции 14–10 мкм (10–15 %). Остальные частицы имеют размеры менее 10 мкм, причем значительная доля частиц фракции до 1 мкм.

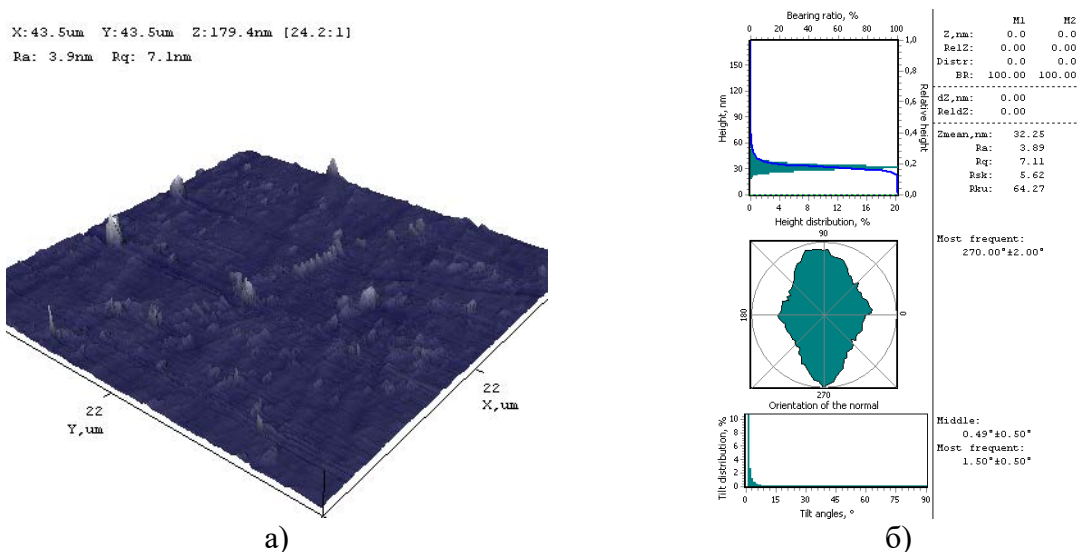


Рисунок 8 – Результаты АСМ исследования поверхности обрабатываемого образца: а – морфология поверхности; б – статистические характеристики нанорельефа

Таким образом, анализ морфологии поверхностей алмазоабразивных композиций на металлической, органической связке, показал изменения характера морфологии кристалла искусственного алмаза в зависимости от скорости износа связки.

Износ поверхности кристалла искусственного алмаза происходит следующим образом. При растворении связки зерно выступает над ее поверхностью и перемещается по кристаллу искусственного алмаза. При достижении определенного давления вершина разрушается (крошится) с образованием площадки износа. Зерно контактирует с поверхностью плоской вершиной.

По мере растворения связки давление на вершину возрастает. Зерно разрушается на несколько осколков размерами 20–1 мкм. Одновременно перемещаясь и соударяясь с поверхностью, зерно с плоской вершиной деформирует поверхность кристалла. Накопление дефектов приводит к выкрошиванию фрагментов размерами 0,1–1 мкм. Об этом свидетельствует микро-рельеф поверхности кристалла (выступы и впадины с характерным масштабом 0,1–1 мкм).

Одновременно наблюдается и иной механизм разрушения поверхности кристалла. Зерно при соударении с кристаллом вдавливаясь в дефектный слой кристалла, постепенно разрушается, формируя расширяющуюся царапину. Затем зерно с плоской вершиной разрушается на несколько частиц, которые сохраняются в связке. Осколки, удерживаемые связкой, также участвуют в износе поверхности кристалла и далее разрушаются. Совокупность таких царапин формирует морфологию поверхности. Чем больше размер зерна (и больше его прочность), тем глубже рельеф, формируемый на поверхности кристалла. Существование на поверхности кристалла царапин с различной морфологией микро-рельефа и характерным масштабом элементов 0,1–1 мкм небольшое (5–10 %). Содержание в продуктах износа крупных осколков искусственного алмаза показывает, что износ поверхности кристалла при алмазоабразивной обработке протекает как за счет разрушения (резания) поверхности острой вершиной, так и путем микросколов при соударении плоской вершины с поверхностью кристалла. Варьирование характеристик связки позволяет изменять и морфологию поверхности кристалла.

Различия в механизмах износа алмазоабразивных композиций на органической и металлической связках определяют эксплуатационные характеристики инструмента. Композиции на органической связке способны адаптироваться к изменению условий в обработке (давления шлифования, вибрация), формируют менее глубокий рельеф с менее выраженным дефектным слоем – микротрещины под цилиндрической или конической поверхностью. Удельный расход алмазного порошка несколько больше, чем в композициях на металлической связке (до 20 %) при более высокой (на 25–40 %) скорости шлифования однородных матовых обрабатываемых поверхностей.

Экспериментально установлено, что для получения цилиндрической и конической поверхности при черновой обточке лучше всего использовать круги на органической связке с размером зерна алмазного порошка 63/40, при этом шероховатость поверхности после обработки $R_a = 2,5–5$ нм. Для полустачковой обточки необходимо использовать круги на органической связке с размером зерна 20/14, при этом шероховатость обработанной поверхности – $R_a = 0,8–1,6$ нм.

Специальный шлифовальный диск изготавливается из стали 40 или стали 45. Рабочее полотно специального шлифовального диска состоит из двух рабочих зон. Периферийная зона футерована текстолитовым материалом шириной до 60 мм в рабочей зоне шлифовального диска; вторая зона, расположенная ближе к центру – из стали корпуса. Специальный шлифовальный диск притирается карбидом кремния N8 и шаржируется алмазным порошком АСН 7/5 на клеевой связке БФ-6.

Проводилось определение оптимальных параметров нагрузки при обработке цилиндрических и конических поверхностей алмаза. Обработка кристаллов проводилась на полуавтомате круглошлифовальной модели ЛЗ-270, оснащенном ваттметром для замера нагрузок задаваемых обдирочным кругом на обрабатываемый кристалл. Задавалась нагрузка от 6,88–10,2 Н.

Произведена оценка качества обработанных поверхностей искусственного алмаза образцов № 1 (нагрузка 7,2 Н), № 2 (нагрузка 8,3 Н), № 3 (нагрузка 9,7 Н) методом АСМ и методом микропрофилирования. Установлено, что оптимальным является технологический режим с нагрузкой ~ 8,3 Н.

Результаты, представленные выше, показывают, что в ходе полировки происходит химическая фазовая трансформация. Но следует учитывать и такую возможность, что во время полировки происходит механическое отделение материала алмаза, который впоследствии превращается в другие формы углерода.

Заключение. Проведённые исследования показывают, что при механической обработке от алмаза отделяются частицы, состоящие из аллотропных модификаций углерода (графит, α - и β -карбины и пр.). Это указывает, что полировка происходит за счёт трансформации межатомных связей в ходе термохимических процессов. Установлено, что процесс износа, например в направлении [100] на грани (110), не может быть процессом только механического износа. Показано, что полировка происходит при фазовых превращениях природных алмазов и отделения материала от поверхности. Этот механизм определяется зависимостью коэффициента трения, а соответственно и энергии активации процесса износа от нагрузки и выбора кристаллографического направления.

В результате исследований методом РЭМ установлено, что для обработки плоских поверхностей искусственного алмаза оптимальным для применения является шлифовальный диск укатанный, с двойным алмазосодержащим слоем: первый слой – порошок АСН 14/10 с вкраплениями Ni, второй алмазосодержащий слой с порошком АСН 10/7 с вкраплениями Fe. Для повышения работоспособности алмазного инструмента в режиме полирования плоских поверхностей искусственного алмаза предложен способ подготовки рабочей поверхности шлифовального диска, заключающийся в повторном нанесении на алмазосодержащее покрытие равномерного слоя пасты алмазной металлизированной марки ПОМ АСМ 7/5 или АСМ 5/3. Полирующая способность шлифовального алмазного инструмента возникает в результате образования на алмазных зернах площадок износа и сохраняется до тех пор, пока размер их не превышает 3 мкм.

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. Нанокристаллические алмазные CVD-пленки : структура, свойства и перспективы применения / И. И. Выровец [и др.] // ФП ФИП PSE. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 4–19.
3. Алмаз электронного качества. Инновации. Инвестиции. Креативные проекты / В. Лучинин [и др.] // Технологическое оборудование и материалы. Электроника : Наука. Технология. Бизнес. – 2023. – № 4. – С. 70–89.
4. Диордица, В. В. Теплоотводы на основе алмаза / В. В. Диордица // Материалы 70-й студенческой научно-технической конференции : тез. докл. студ. БНТУ / редкол. : Е. Е. Трофименко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 128–131.
5. Tsang Diamond FinFET without Hydrogen Termination [Electronic resource] / Biqin Huang, Xiwei Bai, Stephen K. Lam Kenneth K. // Journal Scientific Reports. – 2020. – Mode of access : www.nature.com/scientificreports. – Date of access : 19.07.2023.
6. Diamond UV detectors for future solar physics missions / J. F. Hochedez [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2001. – Vol. 10. – P. 673.
7. Полевой транзистор на гидрированной поверхности алмаза / Ю. В. Гуляев [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2014. – № 59 (3). – С. 304–310.
8. Инструмент.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://instrumer.ru/shlifovalnye-krugi/>. – Дата доступа : 15.03.2025.
9. Изучение влияния параметров обработки на протекание поверхностных нанопроцессов при формообразовании синтетических алмазов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершневу, С. И. Соколов, А. Н. Купо // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2021. – № 6 (129). – С. 159–163.

Краткие сообщения

УДК 523.64

EDN: VAKGAT

Комета C/2024 G3 (ATLAS): основные характеристики, специфика поведения ядра и динамика изменения звёздной величины

М.М. ПУГАЧЁВ, Г.Ю. ТЮМЕНКОВ

Приведены характеристики орбиты кометы C/2024 G3 (ATLAS). Отмечены специфика наблюдения и особенности ее поведения: распад и исчезновение ядра, дальнейшее автономное поведение хвоста. Графически проиллюстрирован характер изменения звёздной величины. Показана явная полезность использования сетевых баз кометных данных.

Ключевые слова: комета, эксцентриситет, перигелий, звёздная величина, ядро кометы, хвост кометы.

The characteristics of the orbit of comet C/2024 G3 (ATLAS) are presented. The specifics of observation and its behavior are noted: the decay and disappearance of the nucleus, the subsequent autonomous behavior of the tail. The character of the change in stellar magnitude is graphically illustrated. The obvious usefulness of using network comet databases is shown.

Keywords: comet, eccentricity, perihelion, magnitude, comet nucleus, comet tail.

Введение. Комета была обнаружена с помощью системы ATLAS 5 апреля 2024 г. Область происхождения – кометное облако Оорта. Вид орбиты предполагал, что в точке перигелия 13 января 2025 г. [1] комета приблизится на расстояние 0,0936 а.е. (14 миллионов км) к Солнцу и станет видимой невооруженным глазом. Максимальная яркость будет достигнута уже 14 января, согласно прогнозу базы данных наблюдений комет (COBS) [2], при этом звёздная величина кометы окажется близкой к значению $m = -3,0$. Кроме того, сложная геометрия образующегося хвоста говорила о неоднородности ядра кометы, что допускало возможность его разрушения и с дальнейшим исчезновением кометы как небесного тела.

Цель работы – продемонстрировать возможность визуального наблюдения эволюционных изменений кометы, таких как первичный распад ядра, его полную деструкцию и поведение остаточного хвоста, опираясь на данные, например, COBS; показать, сопровождающие эти процессы изменения звёздной величины.

Результаты и обсуждение. Оказалось, что комета имеет ретроградную орбиту, с наклонением на угол $116,8^\circ$ к эклиптике. Она располагается так, что комета не приближалась и не приблизится к газовым гигантам Солнечной системы. Согласно данным JPL Horizons [3], орбита кометы является эллиптической, причем гравитационные возмущения от планет земной группы могут привести к увеличению периода обращения со 180 тыс. до 600 тыс. лет.

Далее, что касается яркости и наблюдаемости кометы. Вскоре после открытия комета имела видимую величину около +19,0. Диаметр комы при этом составлял 4,5 угловой секунды, а длина хвоста была равна 1 угловой секунде. К началу ноября 2024 г. видимая величина кометы достигла +12,0, диаметр комы 0,7 угловой минуты, длина хвоста приблизилась к 1 угловой минуте. В конце декабря видимая величина составила +4,9, а длина хвоста – 12 угловых минут.

Уже 2 января 2025 г. австралийский астроном Терри Лавджой, наблюдая комету в бинокль, отметил [4], что она стала значительно ярче, чем в предыдущие дни, и оценил ее видимую величину как +3,7. Последующие наблюдения подтвердили внезапный рост блеска до уровня примерно +2,5. К тому же в хвосте кометы была замечена тёмная полоса, что явно свидетельствовало о вспышке в ядре кометы. 3 января стали появляться сообщения о новых наблюдениях кометы теперь уже невооружённым глазом, при этом видимая величина составляла +2,0. Длина хвоста выросла до 0,5 углового градуса (что примерно равно угловому размеру диска Луны). 12 января комета была сфотографирована космонавтом Иваном Вагнером с борта МКС [5] (рисунок 1).



Рисунок 1 – Комета C/2024 G3, 12.01.2025
(снимок И. Вагнера, МКС)

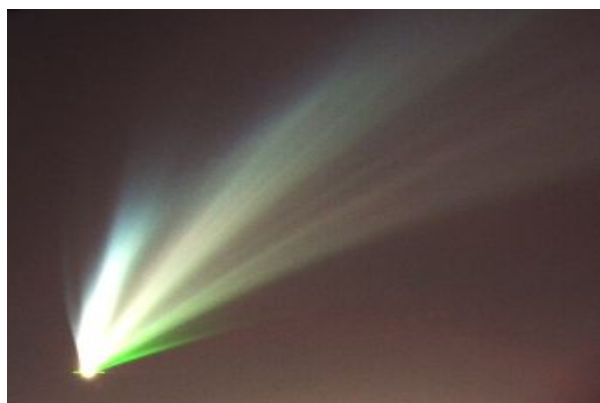


Рисунок 2 – Комета C/2024 G3 в поле зрения
SOHO LASCO C3, 13.01.2025

11 января комета вошла в поле зрения коронографа SOHO LASCO C3 [6] (рисунок 2). Максимум яркости был достигнут 14 января [7], через день после прохождения кометой перигелия. Видимая величина кометы в пике яркости была оценена в $-3,0$. В этот же день были получены многочисленные фотографии кометы на дневном небе [8], а также единичные сообщения о видимости кометы невооружённым глазом в дневное время [9]. За последние 100 лет только четыре кометы достигали сравнимой яркости: C/1927 X1 (Скьеллерупа – Мари-стани), C/1965 S1 (Икэя – Сэки), C/1975 V1 (Веста) и C/2006 P1 (Макнота) [10].

Пройдя перигелий, комета стала быстро удаляться от Солнца, из-за чего условия её наблюдения улучшались, но в то же время её блеск по той же причине начал падать. В то же время длина хвоста кометы стала стремительно расти. 17 января сообщалось о длине хвоста в 2 градуса, 18 января – в 4 градуса. Видимая звёздная величина при этом составляла около -1 .

19 января венгерский астрофотограф Лионель Майжик сообщил о резком потускнении головы кометы [11]. На следующий день она стала неразличима на снимках (рисунок 3).



Рисунок 3 – Комета C/2024 G3 18 – 20 января 2025 г. (снимки Л. Майжика)

Всё это свидетельствовало об окончательном распаде уцелевших после сближения с Солнцем фрагментов кометного ядра. Как следствие, блеск кометы снизился ещё сильнее, примерно до значения $+2,4$. Несмотря на все эти изменения, хвост кометы сохранил свою форму и продолжил удлиняться. 21 января была зарегистрирована максимальная длина хвоста в 15 угловых градусов.

По мере удаления от Солнца блеск хвоста продолжал падать. К началу февраля он перестал быть видимым невооружённым глазом. Последние его наблюдения 23 февраля были при видимой звёздной величине $+8,5$. Со временем вещество остаточного хвоста рассеется в космическом пространстве, сама же комета как небесное тело погибла!

Ниже на рисунке 4 показано, как изменялась звёздная величина кометы от момента с $m = +10$ до её разрушения и гибели.

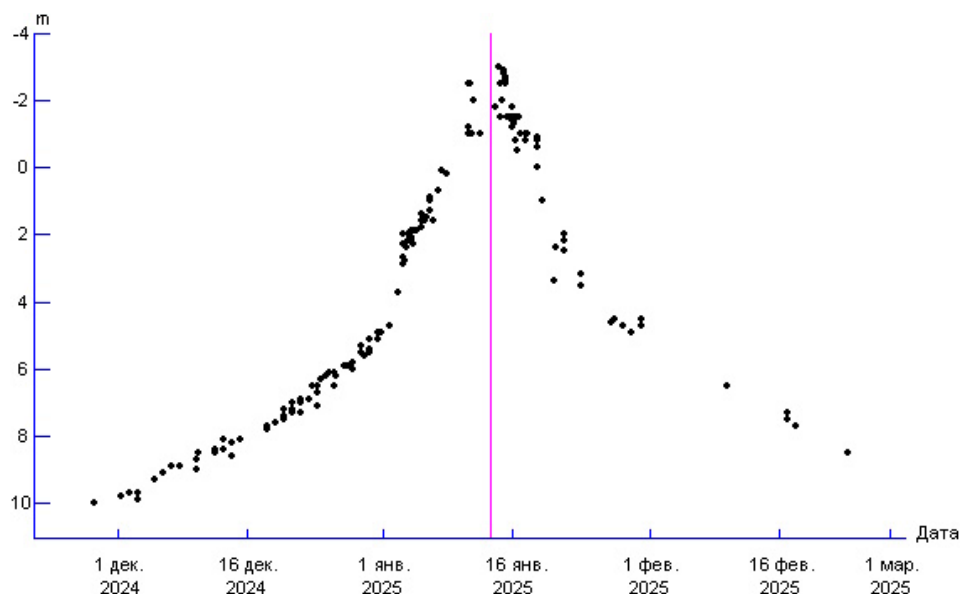


Рисунок 4 – Изменение видимой звездной величины кометы C/2024 G3 (ATLAS) в процессе наблюдений, согласно [7]

Заключение. Таким образом, в сообщении отражены главные элементы последней стадии эволюции кометы C/2024 G3 (ATLAS) от момента обнаружения до окончательного распада ядра кометы и её исчезновения как небесного тела. Показан характер изменения яркости с моментом достижения ее максимума в терминах видимой звездной величины. Комета C/2024 G3 (ATLAS) была одной из ярчайших за последние 100 лет.

Литература

1. MPEC 2024-H22 : Comet C/2024 G3 (ATLAS) [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K24/K24H22.html>. – Date of access : 18.11.2024.
2. Observation list for C/2024 G3 [Electronic resource]. – Mode of access : https://cobs.si/obs_list?id=2525/. – Date of access : 14.11.2024.
3. Barycentric Osculating Orbital Elements for Comet C/2024 G3 (ATLAS) in epoch 1800 and 2200 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://ssd.jpl.nasa.gov/>. – Date of access : 12.11.2024.
4. C/2024 G3 in outburst? [Electronic resource]. – Mode of access : https://groups.io/g/comets-ml/topic/c_2024_g3_in_outburst_jan/110395805/. – Date of access : 04.01.2025.
5. Снимки с потрясающей детализацией кометы C/2024 G3 в ночь на 12 января снял космонавт Иван Вагнер с МКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://news.myseldon.com/>. – Дата доступа : 12.03.2025.
6. C/2024 G3 (ATLAS) [Electronic resource] – Mode of access : <http://aerith.net/comet/catalog/2024G3/2024G3.html/>. – Date of access : 12.11.2024.
7. Once-in-a-160000-year comet G3 ATLAS could shine as bright as Venus next week. Here's what to expect [Electronic resource]. – Mode of access : <https://space.com/>. – Date of access : 14.01.2025.
8. Spaceweather Time Machine : Tuesday, Jan. 14, 2025 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://spaceweather.com/>. – Date of access : 14.01.2025.
9. Grab Your Binoculars for Comet ATLAS's Brief Sunset Show [Electronic resource]. – Mode of access : <https://skyandtelescope.org/>. – Date of access : 18.01.2025.
10. Why Comet G3 (ATLAS) will be 'remembered as the Great Comet of 2025' [Electronic resource]. – Mode of access : <https://space.com/>. – Date of access : 28.01.2025.
11. Spaceweather Time Machine : Monday, Jan. 20, 2025 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://spaceweather.com/>. – Date of access : 20.01.2025.

К вопросу о краниологическом патоморфологическом мониторинге рукокрылых

А.А. САВАРИН¹, А.М. ОСТРОВСКИЙ²

В июле 2024 г. осуществлен сбор погадок серой неясыти (*Strix aluco*) в д. Карповка Лоевского района Гомельской области. В одной из погадок найден череп позднего кожана (*Eptesicus serotinus*). Выявленные патологии мозгового отдела (истончение теменных костей, многочисленные теменные отверстия большого диаметра, значительные вдавления кровеносных сосудов в костную ткань и др.) свидетельствуют не только о хроническом течении патофизиологических процессов, но и предполагают их воздействие на поведение особей рукокрылых, в том числе, и в зимний период.

Ключевые слова: *Eptesicus serotinus*, череп, патология, этологические особенности, зимняя спячка.

In July 2024, the collection of gray owl (*Strix aluco*) pellets in the village of Karpovka, Loev district, Gomel region was carried out. The skull of *Eptesicus serotinus* was found in one of the pellets. The revealed pathologies of the brain section (thinning of parietal bones, numerous parietal holes of a large diameter, significant indentations of blood vessels in the bone tissue, etc.) indicate not only the chronic course of pathophysiological processes, but also suggest their impact on the behavior of bats, including in winter.

Keywords: *Eptesicus serotinus*, skull, pathology, ethological features, hibernation.

Введение. Поздний кожан *Eptesicus serotinus* (Schreber, 1774) в настоящее время является обычным, широко распространенным и зимующим видом рукокрылых на территории Беларуси [1]. Летучие мыши не имеют важного значения в питании сов, составляя около 1–2 % пищевых объектов этих хищников [2]. В погадках сов черепа мелких млекопитающих хорошо сохраняются, что позволяет диагностировать не только видовую принадлежность и возраст поедаемых зверьков, но и патологии краниального скелета [3], [4]. Краниологический мониторинг, направленный на выявление патофизиологических процессов и их динамики, является одним из эффективных методов индикации качества среды обитания млекопитающих.

Цель работы – обратить внимание специалистов на анализируемый случай патологий мозгового отдела черепа у позднего кожана, высказать предположение на причину их возникновения.

Результаты и обсуждение. В июле 2024 г. был осуществлен сбор погадок серой неясыти (*Strix aluco*) внутри заброшенной фермы в д. Карповка Лоевского района. Географические координаты объекта: 52.019604N, 30.901364E. В одной из погадок найден череп позднего кожана (*E. serotinus*) (рисунок 1). Краниологические характеристики взрослой особи: кондилобазальная длина – 20,4 мм; скуловая ширина – 14,4 мм; межглазничная ширина – 4,4 мм; высота нижней челюсти – 5,7 мм; выемка переднего края неба – прямоугольная, заднего края – с острым шипом.

Затылочные кости имели целый ряд патоморфологических характеристик на левой и правой сторонах свода (рисунок 2): обширные области истончения костной ткани (рисунок 2, 1); многочисленные (всего 5) теменные отверстия большого диаметра (рисунок 2, 2); широкие вдавления кровеносных сосудов (рисунок 2, 3).



Рисунок 1 – Череп *Eptesicus serotinus*: дорзальная (А) и вентральная (Б) стороны

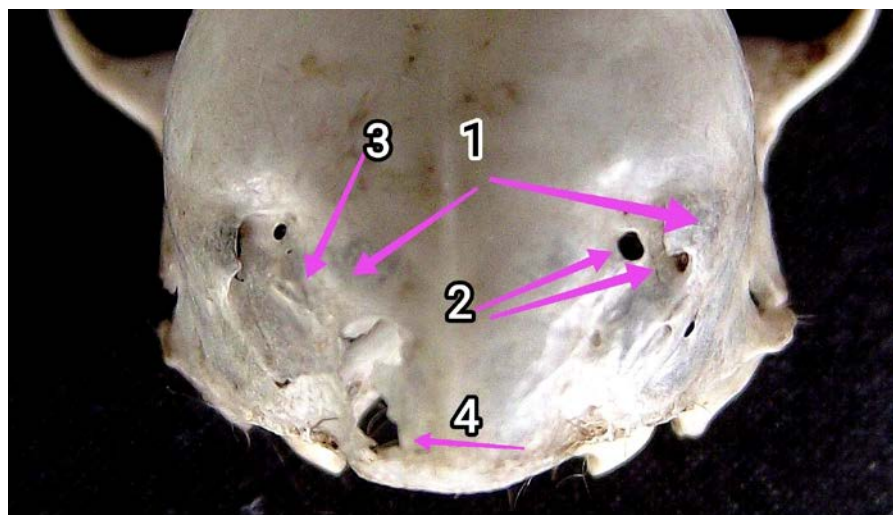


Рисунок 2 – Морфо-анатомические особенности теменных костей:
1 – истончение костной ткани, 2 – многочисленные теменные отверстия большого диаметра; 3 – вдавления кровеносных сосудов, 4 – механическое повреждение

За теменными отверстиями в направлении к затылочным костям значительная часть поверхности теменных костей была складчатой.

Выявленные патологии мозгового отдела свидетельствуют о хроническом течении патофизиологических процессов.

В задней части левой теменной кости имелось одно отверстие, вызванное механическим повреждением клювом птицы (рисунок 2, 4).

Следует заметить, что ранее [3] также в черепе позднего кожана (найден в погадке ушастой совы в г. Кобрин Брестской области) на внутренней поверхности свода (*facies fornicis interna*) диагностированы патоморфологические изменения: усиление отпечатков кровеносных сосудов мозга и значительное по площади отложение солей кальция. Высказано мнение [3], что патофизиологические процессы теоретически могут вызвать и нарушение гибернации – пробуждение зверька.

Заключение. Выявленный нами повторный случай патоморфологических изменений мозгового отдела черепа у позднего кожана делает высказанное мнение о возможном влиянии этих изменений на поведение особей рукокрылых, в том числе, и на гибернацию, более основательным. Традиционно же считается, что пробуждение летучих мышей в зимний период обусловлено выведением продуктов обмена [5]. Однако летучие мыши являются переносчиками многих видов эндо- и эктопаразитов (как многоклеточных, так и одноклеточных) [6], [7 и др.], способных не только ослабить иммунитет и жизнеспособность особей, но и вызвать течение патофизиологических процессов в костной ткани и центральной нервной системе.

Для проведения краниологического патоморфологического мониторинга необходимо сотрудничество специалистов различных профилей.

Литература

1. Shpak, A. Hibernating bat species of Belarus : results of the work of the Minsk bat contact centre 'Kazhanapolis' (2018–2022) / A. Shpak // *Theriologia Ukrainica*. – 2023. – № 25. – P. 55–67.
2. Шариков, А. В. Рукокрылые в питании сов Северной Евразии / А. В. Шариков, Т. В. Макарова // *Plecotus et al.* – 2014. – № 17. – С. 30–36.
3. Саварин, А. А. О находке *Eptesicus serotinus* (Schreber, 1774) в погадках ушастой совы (*Asiotus*) на юго-западе Белорусского Полесья / А. А. Саварин, Д. А. Кителъ // *Plecotus et al.* – 2016. – № 19. – P. 51–55.
4. Savarin, A. Osteological material and the population state of the speckled ground squirrel (*Spermophilus suslicus*) on the periphery of the species, distribution (Belarus) / A. Savarin, S. Shokalo // *Theriologia Ukrainica*. – 2023. – № 25. – P. 100–108.
5. Зимняя спячка летучих мышей (*Vespertilionidae*) на крайнем северо-востоке их ареала / А. И. Ануфриев [и др.] // Доклады Академии наук. – 2003. – № 1. – С. 132–134.
6. Хицова, Л. Н. Сообщество эктопаразитов кожана позднего *Eptesicus serotinus* (Schreber, 1774) в условиях Усманского бора / Л. Н. Хицова, Е. И. Шерстяных // Вестник Воронежского государственного университета. – 2014. – № 2. – С. 96–101.
7. Шималов, В. В. Трематоды рода *Plagiorchis* (Trematoda, Plagiorchiidae) у летучих мышей в Беларуси и их медицинское значение / В. В. Шималов // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. – 2022. – № 3. – С. 6–9.

¹Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

²Гомельский государственный
медицинский университет

Поступила в редакцию 14.04.2025

Персоналии

УДК 512:94((47+57)+476):087.6:929

EDN: XCPTKR

Полиадическое наследие Юрия Ивановича Кулаженко

А.М. ГАЛЬМАК¹, В.С. МОНАХОВ², В.Г. САФОНОВ³, А.Н. СКИБА²

Статья посвящена памяти доктора физико-математических наук Кулаженко Юрия Ивановича (27.05.1964–11.12.2024). Приведен обзор полученных им научных результатов в области n -арных групп и полиадических операций.

Ключевые слова: Ю.И. Кулаженко, полиадические операции, n -арные группы.

The article is dedicated to the memory of Doctor of Physical and Mathematical Sciences Yuri Ivanovich Kulazhenko (05.27.1964–12.11.2024). An overview of his scientific results in the field of n -ary groups and polyadic operations is given.

Keywords: Yu.I. Kulazhenko, polyadic operations, n -ary groups.



Юрий Иванович Кулаженко родился 27 мая 1964 г. в д. Ручаёвка Лоевского района Гомельской области. В 1981 г. после окончания Ручаёвской средней школы, поступил на математический факультет Гомельского государственного университета, который успешно закончил в 1986 г. и был распределен в Долголесскую СШ Гомельского района на должность учителя математики. В 1988 г. Юрия Ивановича назначили заместителем директора по учебно-воспитательной работе Верхно-Брилёвской СШ Гомельского района.

С 1990 г. по 1992 г. Юрий Иванович обучался в аспирантуре Белорусского института инженеров железнодорожного транспор-

та по специальности 01.01.06 – математическая логика, алгебра и теория чисел. После завершения учёбы в аспирантуре он работал ассистентом на кафедре «Высшая математика» БИ-ИЖТа, затем с 1994 г. – заместителем декана общеинженерного строительного факультета, с 1997 г. – начальником отдела по воспитательной работе, а с июня 1997 г. – проректором по воспитательной работе Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ).

В 2004 г. Ю.И. Кулаженко переводом был назначен на должность первого проректора Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, а в 2014 г. на должность начальника управления подготовки научных кадров высшей квалификации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 26 октября 2016 г. он был назначен на должность ректора БелГУТа.

На всех этапах своей деятельности Юрий Иванович отличался огромным трудолюбием, высоким профессионализмом, умением создавать и поддерживать творческую и доброжелательную атмосферу среди преподавателей, сотрудников и студентов. Работая на любых, даже самых высоких должностях, он продолжал заниматься преподавательской деятельностью, читая на высоком уровне лекции и осуществляя иные виды педагогической работы. Не забывал он и о научной деятельности, активно публикуясь в научных журналах, в том числе зарубежных (Algebra and Discrete mathematics, Quasigroups and Related Systems, Southeast Asian Bulletin

of mathematics, Mathematical Sciences Research Journal (USA), Труды Института математики и механики УрО РАН, Asian-European J. Math.), а также регулярно участвуя в международных научных, научно-практических и научно-методических конференциях.

В настоящее время полиадические операции относятся к числу активно изучаемых математических объектов, интерес к которым вызван не в последнюю очередь открывающимися возможностями их приложений, в частности в геометрии. Наиболее перспективными в этом отношении являются полиадические операции, являющиеся аналогами групповых операций. Особый интерес при этом представляют полуабелевые полиадические операции, которые можно рассматривать как обобщение коммутативных бинарных операций.

Постепенное накопление результатов, относящихся к полуабелевым полиадическим операциям, привело, в конечном счёте, к осознанию необходимости нахождения приложений полиадических операций, прежде всего в геометрии. Указанное обстоятельство, доказывая актуальность исследований Ю.И. Кулаженко, послужило также одной из причин, по которой он посчитал привлекательным и перспективным выбранное направление исследований.

Развитие этого направления до Юрия Ивановича наиболее успешно осуществлял его научный руководитель Степан Афанасьевич Русаков, который, активно и плодотворно развивая общую теорию полиадических групп, уделял в то же время значительное внимание поиску их приложений. Одной из сфер таких приложений, как показал С.А. Русаков в своей монографии «Некоторые приложения теории n -арных групп», изданной в 1998 г. издательством «Беларуская навука», является геометрия.

Отметим, что С.А. Русаков является учеником основателя Гомельской алгебраической школы академика Сергея Антоновича Чунихина, опубликовавшего в 1945 г. в журнале «Доклады АН СССР» статью «К теории неассоциативных n -групп с постулатом K ». Эта статья, как и статьи немецкого математика Вильгельма Дёрнте «Untersuhungen über einen veralgemeinerten Gruppenbegriff» (Mathematische Zeitschrift, 1928) и американского математика Эмиля Поста «Polyadic groups» (Trans. Amer. Math. Soc., 1940), относится к основополагающим в теории n -арных групп.

Развивая идеи своего научного руководителя, Ю.И. Кулаженко продвинулся значительно дальше своих предшественников. Он ответил на ряд открытых вопросов и получил новые глубокие результаты, являющиеся значительным вкладом в теорию n -арных групп вообще и полуабелевых n -арных групп в частности. Можно сказать, что актуальная тема изучения полуабелевых n -арных групп и их приложений в геометрии является лейтмотивом алгебраических исследований Ю.И. Кулаженко.

Созданные им новые методы изучения полиадических операций, применяемые к исследованию геометрических объектов, можно рассматривать с одной стороны как применение теории n -арных групп в геометрических исследованиях, а с другой стороны как использование геометрических методов для развития теории n -арных групп, в частности, для нахождения новых критериев полуабелевости n -арной группы. Эти новые критерии полуабелевости n -арной группы являются геометрическими, так как позволяют распознавать полуабелевы n -арные группы в классе всех n -арных групп с помощью объектов аффинной геометрии. В формулировках геометрических критериев полуабелевости n -арной группы присутствуют многоугольники, вершинами которых являются элементы n -арной группы или векторные равенства.

Именно распознаванию полуабелевых n -арных групп в классе всех n -арных групп с помощью геометрических объектов посвящена кандидатская диссертация «Критерии полуабелевости n -арных групп», подготовленная Ю.И. Кулаженко под руководством С.А. Русакова, которую он защитил 23 июня 1998 г. в Совете по защите диссертаций Д 02.12.01 при Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины.

Актуальность нахождения новых критериев полуабелевости n -арных групп определяется тем, что класс всех полуабелевых n -арных групп является одним из самых широких в теории полиадических групп. Он включает в себя все циклические, полумиклические, абелевы, m -полуабелевы и многие другие классы полиадических групп. Поскольку недостаточное число внешних критериев полуабелевости n -арных групп в какой-то степени тормозило раз-

витие различных приложений теории полиадических групп, то очевидно, что геометрические критерии полуабелевости n -арной группы Ю.И. Кулаженко будут востребованы при нахождении новых приложений теории n -арных групп.

В нахождении указанных приложений оказалось востребованным ещё одно направление исследований в области полиадических операций, в развитие которого значительный вклад внёс Ю.И. Кулаженко. Это направление основано на введённом им понятии самосовмещения элементов n -арной группы. Основное отличие и преимущество полученных Ю.И. Кулаженко результатов от известных результатов в области самосовмещений правильных многоугольников, многогранников, прямой, окружности заключается в том, что он изучал самосовмещения элементов n -арных групп, используя при этом геометрические объекты, которые далеко не всегда имеют правильную геометрическую форму. Это означает, что в полиадическом случае область исследований является гораздо более обширной по отношению к известным ранее исследованиям в области самосовмещений, а сами полученные результаты послужат, несомненно, развитию общей теории полиадических групп и их приложений.

Исследования Ю.И. Кулаженко, связанные с изучением самосовмещений элементов n -арных групп, и другие его результаты, выполненные после защиты кандидатской диссертации, вошли в докторскую диссертацию «Полиадические операции и их приложения», которую он представил в тот же Совет по защите диссертаций Д 02.12.01 при учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.06 – математическая логика, алгебра и теория чисел. Успешная защита диссертации состоялась 15 мая 2015 г. В заключении Совета отмечено, что «Совокупность представленных в диссертации результатов может быть квалифицирована как крупное достижение в одном из направлений современной алгебры – теории полиадических операций».

Основные научные достижения Ю.И. Кулаженко, связанные с приложениями n -арных групп в геометрии, отражены в его монографии «Полиадические операции и их приложения», изданной в 2014 г. Он также является соавтором изданной годом ранее монографии «Полиадические операции на множествах функций».

Важное значение полученных Ю.И. Кулаженко результатов высоко оценили в своих отзывах официальные оппоненты на защите его докторской диссертации и эксперт оппонирующей организации – Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург. Приведем небольшие фрагменты из их отзывов.

В.А. Артамонов, заведующий кафедрой высшей алгебры Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, доктор физ.-мат. наук, профессор: «Рецензируемая диссертация посвящена созданию новых методов изучения полиадических групп и их применению к исследованию объектов аффинной геометрии. Считаю, что диссертация Кулаженко Ю.И. «Полиадические операции и их приложения» является значительным вкладом в развитие теории полиадических операций и их приложений».

В.В. Беняш-Кривец, заведующий кафедрой высшей алгебры и защиты информации Белорусского государственного университета, доктор физ.-мат. наук, профессор: «В диссертации получила дальнейшее развитие общая теория n -арных групп в таких направлениях, как полуабелевы n -арные группы, полиадические операции на декартовых степенях групп, n -арные аналоги подстановок множеств произвольной мощности и приложения полиадических операций в геометрии. Ее результаты могут быть использованы как в самой теории полиадических операций, так и при нахождении их приложений в геометрии».

В.А. Щербаков, главный научный сотрудник лаборатории алгебры и топологии Института математики и информатики Академии наук Республики Молдова, доктор физ.-мат. наук, профессор: «Диссертационная работа Ю.И. Кулаженко посвящена новым классам алгебраических объектов, в ней получены новые результаты, являющиеся существенным вкладом в теорию n -арных алгебраических систем. В частности, им получено значительное число внешних критериев полуабелевости n -арных групп, выраженные через свойства фигур аффинной геометрии, определенных на этих группах. В диссертации разработано новое направление исследований, посвященное приложению полиадических операций в геометрии, связанное с самосовмещением элементов n -арных групп».

А.А. Махнев, заведующий отделом алгебры и топологии Института математики и механики Уральского отделения РАН, доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, профессор: «Отметим, что результаты из главы 5 указывают на особую актуальность задачи приложения полиадических операций в геометрии, поскольку они служат развитию общей теории n -арных групп».

Приведём также цитаты из отзывов на автореферат докторской диссертации Ю.И. Кулаженко, подчёркивающие практическую значимость его научных результатов.

В.К. Конопелько, заведующий кафедрой сетей и устройств телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор: «Следует отметить, что результаты, полученные диссертантом в области приложения полиадических операций в геометрии, используются в технике, в частности, в системах формирования и обработки образов в помехоустойчивом кодировании, а также системах обработки видеоданных».

В.А. Липницкий, заведующий кафедрой высшей математики Военной академии республики Беларусь, доктор технических наук, профессор: «Результаты диссертационной работы могут быть использованы не только для исследований в области теории n -арных групп, но также в технических системах обработки информации. В частности, при решении задач совмещения аэроизображений, поиска и сопровождения движущихся целей на кадрах видеопотока, принимаемого с борта беспилотного летательного аппарата, идентификации объектов».

Весь жизненный путь Юрия Ивановича тесно связан с двумя вузами Гомеля. В государственном университете имени Франциска Скорины он учился и был первым проректором. В Белорусском государственном университете транспорта окончил аспирантуру, преподавал высшую математику, был заместителем декана, проректором, ректором. Он внес значительный вклад в развитие системы высшего образования Республики Беларусь. Неугасимая энергия и личное обаяние Юрия Ивановича снискали заслуженное уважение среди коллег не только в Республике Беларусь, но и за её пределами.

Светлая память о Юрии Ивановиче КУЛАЖЕНКО навсегда сохранится в наших сердцах.

¹Белорусский государственный университет
пищевых и химически технологий

²Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

³Институт математики НАН Беларуси

Ответственный секретарь: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *Е.Н. Федорова, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 20.05.2025. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 13,77. Тираж 20 экз. Заказ № 314.
Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:
издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.