

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3(126)

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 О.М. ДЕМИДЕНКО,
д-р тех. наук, профессор
Зам. главн. редактора М.В. СЕЛЬКИН,
д-р физ.-мат. наук, профессор

Члены редакционной коллегии:

Г.Г. Гончаренко, д-р биол. наук, проф.,
чл.-корр. НАН Беларуси
Ф.В. Кадол, д-р пед. наук, проф.
В.Н. Калмыков, д-р филос. наук, проф.
В.И. Коваль, д-р филол. наук, проф.
Г.Г. Лазько, д-р ист. наук, проф.
И.В. Семченко, д-р физ.-мат. наук, проф.
В.С. Смородин, д-р тех. наук, проф.
Б.В. Сорвилов, д-р экон. 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 Scorina 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 O.M. DEMIDENKO,
Sc. D., Professor
Deputy editor-in-chief M.V. SELKIN,
Sc. D., Professor

Members of editorial board:

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

Members of editorial board for the natural sciences

V.S. Averin, Sc. D., Professor
V.F. Baginsky, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A. Ballister-Bolinshes (Spain), Sc. D., Professor
Van Siao Fen (China), Sc. D., Professor
Go Wenbin (China), Sc. D., Professor
V.P. Kudzin, Sc. D., Professor
A.A. Makhnev (Russia), Sc. D., Professor, Correspond-
ing Member RAS
V.V. Mozharovsky, Sc. D., Professor
A.N. Serdukov, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A.N. Skiba, Sc. D., Professor
Shen Riku (China), Sc. D., Professor
R. Esteban Romero (Spain), Sc. D., Professor
EDITORIAL OFFICE ADDRESS:
246028, Belarus, Gomel, Sovetskaya Str., 104,
Tel: +375 (232) 51-03-21
E-mail: vesti@gsu.by
Site: <http://vesti.gsu.by>

© Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», 2021
© Educational Establishment «Francisk Scorina Gomel State
University», 2021

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2021, № 3 (126) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Гончаренко Г.Г., Румянцева В.Д., Зятьков С.А. <i>Полиморфизм гена дофамина рецептора DRD4 связанного с переносом дофамина в нейронных структурах</i>	5
Гулаков А.В., Дроздов Д.Н. <i>Динамика мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на территории радиоактивного загрязнения</i>	9
Дайнеко Н.М., Концевая И.И., Тимофеев С.Ф., Козел М.С. <i>Сравнительный анализ численности микроорганизмов на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и минерализованном торфянике под влиянием микробных деструкторов</i>	15
Калиниченко С.А., Никитин А.Н., Шуранкова О.А. <i>Накопление ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am шляпочными грибами в экосистемах с различным режимом увлажнения зоны отчуждения ЧАЭС</i>	21
Карпенко А.Ф. <i>Динамика обеспеченности почв кальцием</i>	28
Концевая И.И. <i>Эффект антибиотиков разных химических групп на генотоксичность в Allium тесте</i>	33
Лазарева М.С., Климович Л.К., Климов А.В., Мальцева Н.В. <i>Анализ видовой структуры дубовых древостоев и прогноз их развития</i>	39
Лазарева М.С., Падутов А.Е., Мальцева Н.В. <i>Обследование территории республиканского биологического заказника «Днепро-Сожский» с целью изучения распространения инвазивных чужеродных видов растений</i>	43
Мялик А.Н., Кручонок А.В., Гулис А.Л. <i>Новые флористические находки редких и охраняемых аборигенных видов на территории Беларуси</i>	48
Сушко Г.Г. <i>Программное обеспечение PAST – как инструмент анализа данных в фаунистических исследованиях</i>	55
Танкевич Е.А., Концевая И.И., Никитин А.Н. <i>Основные физиологические группы микроорганизмов торфяной почвы зоны отчуждения ЧАЭС</i>	62
Углынец А.В., Гарбарук Д.К., Турчин Л.М. <i>Современная дендрофлора отселенных деревьев зоны отчуждения Чернобыльской АЭС Беларуси</i>	68
Храмченкова О.М., Матвеевков М.В. <i>Хлороформные и этилацетатные экстракты пяти видов лишайников: фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства</i>	75

ИНФОРМАТИКА

Аксёнова Н.А., Кучеров А.И. <i>Разработка SDK для мобильного приложения с применением технологии дополненной реальности</i>	81
Богуш Р.П., Абламейко С.В., Игнатъева С.А., Адамовский Е.Р. <i>Повышение эффективности обнаружения объектов небольших размеров на 8K изображениях при использовании сверточных нейронных сетей</i>	85
Воруев А.В. <i>Информационная емкость объектов в сопряжении с дополненной реальностью</i>	92
Клименко А.В., Яцковец М.В., Карась Ю.С. <i>Методика оценки экономической надежности IT предприятия на основе нейронных сетей</i>	96

МАТЕМАТИКА

Бородич Р.В., Селькин М.В., Бородич Е.Н., Бородич Т.В., Бузланов А.В. <i>О некоторых свойствах A-допустимых подгрупп конечных групп</i>	101
Бураковский В.В. <i>Несимметричная локальная сеть двойное маркерное кольцо</i>	107
Васильев А.Ф. <i>О сверхразрешимости конечномерных алгебр Ли</i>	111
Можей Н.П. <i>Тензоры Риччи инвариантных связностей на редуцированных пространствах</i> ..	116
Рубин В.А., Рудько О.С., Мастерской Р.И. <i>Методы и средства анализа пользовательской активности в глобальной сети</i>	123
Рудько О.С., Рубин В.А., Алешин Н.А. <i>Методы и способы анализа надежности взаимодействия распределенных систем</i>	128
Старовойтов А.П., Кечко Е.П., Касабуцкий А.Ф. <i>Асимптотические свойства тригонометрических аппроксимаций Паде</i>	132

ФИЗИКА

Андреев В.В. <i>Критические значения расширения Фридрихса релятивистской кулоновской задачи</i>	136
Станчик А.В., Барайшук С.М., Жигулин Д.В., Петлицкий А.Н., Труханова Е.Л., Чумак В.А. <i>Фазовый состав и микроструктура тонких пленок $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$</i>	143

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Островский А.М., Саварин А.А. <i>Находка бурозубки малой (<i>Sorex minutus</i>) в гнезде шершня обыкновенного (<i>Vespa crabro</i>) на юго-востоке Беларуси</i>	150
Цуриков А.Г., Голубков В.В., Перссон П.-Э., Тель А. <i>Краснокнижный вид <i>Cetrelia cetrarioides</i> (Parmeliaceae) подтвержден молекулярно-генетическими данными в Беларуси</i>	152

PROCEEDINGS

of Francisk Scorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

There are 6 times a year

Published since 1999

• 2021, № 3 (126) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Goncharenko G.G., Rumyanceva V.D., Zyat'kov S.A. <i>Polymorphism of the DRD4 dopamine receptor gene linked with dopamine transfer in neural structures</i>	5
Gulakov A.V., Drozdov D.N. <i>Dynamics of the absorbed dose rate of internal irradiation of large mammals living in the territory of radioactive contamination</i>	9
Dajneko N.M., Koncevaya I.I., Timofeev S.F., Kozel M.S. <i>Comparative analysis of the number of microorganisms in sod-podzolic light loamy soil and mineralized peat bog under the influence of microbial destructors</i>	15
Kalinichenko S.A., Nikitin A.N., Shurankova O.A. <i>Accumulation of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am by blewits in ecosystems with various mode of moistening of exclusion zone of the CNPP</i>	21
Karpenko A.F. <i>Dynamics of calcium sufficiency in soils</i>	28
Kontsevaya I.I. <i>Genotoxic effect of antibiotics of different chemical groups in the Allium test</i>	33
Lazareva M.S., Klimovich L.K., Klimov A.V., Maltseva N.V. <i>Analysis of the species structure of oak stands and forecast of their development</i>	39
Lazareva M.S., Padutov A.E., Maltseva N.V. <i>Survey of the territory of the republican biological reserve «Dnepro-Sozhsky» in order to study the distribution of invasive alien plant species</i>	43
Myalik A.N., Kruchonok A.V., Gulis A.L. <i>New floristic findings of rare and protected native species in Belarus</i>	48
Sushko G.G. <i>PAST software as a data analysis tool in faunistic research</i>	55
Tankevich E.A., Kontsevaya I.I., Nikitin A.N. <i>The main physiological groups of microorganisms in the peat soil of the Chernobyl exclusion zone</i>	62
Uglyanecz A.V., Garbaruk D.K., Turchin L.M. <i>Modern dendroflora of resettled villages in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant in Belarus</i>	68
Khramchankova V.M., Matveyenkau M.V. <i>Chloroform and ethyl acetate extracts of five lichen species: photoprotective, cytotoxic and photo-modifying properties</i>	75

INFORMATION TECHNOLOGY

Aksyonova N.A., Kucherov A.I. <i>Development of SDK for a mobile application using augmented reality technology</i>	81
Bogush R.P., Ablamejko S.V., Ignatieva S.A., Adamovskij E.R. <i>Improving the efficiency of detecting small objects in 8K images using convolutional neural networks</i>	85

Voruev A.V. <i>Information capacity of objects in conjunction with augmented reality</i>	92
Klimenko A.V., Yatskovets M.V., Karas Yu.S. <i>Methodology for assessing the economic reliability of IT enterprises based on neural networks</i>	96
MATHEMATICS	
Borodich R.V., Selkin M.V., Borodich E.N., Borodich T.V., Buzlanov A.V. <i>Some properties of A-admissible subgroups of finite groups</i>	101
Burakovskij V.V. <i>Asymmetrical local area network dual token ring</i>	107
Vasil'ev A.F. <i>On supersolubility of finite-dimensional Lie algebras</i>	111
Mozhej N.P. <i>Ricci tensors of invariant connections on reductive spaces</i>	116
V.A. Rubin, O.S. Rud'ko, R.I. Masterskoj. <i>Methods and tools for analyzing user activity in the global network</i>	123
Rud'ko O.S., Rubin V.A., N.A. Aleshin. <i>Methods and ways for analyzing the reliability of the interaction of distributed systems</i>	128
Starovojtov A.P., Kechko E.P., Kasabuczki A.F. <i>Asymptotic properties of trigonometric Padé approximations</i>	132
PHYSICS	
Andreev V.V. <i>Critical values of the Friedrichs expansion of the relativistic Coulomb problem</i>	136
Stanchik A.V., Baraishuk S.M., Zhygulin D.V., Pyatlitski A.N., Trukhanava E.L., Chumak V.A. <i>Phase composition and microstructure of $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ thin films</i>	143
ABSTRACTS	
Ostrovskij A.M., Savarin A.A. <i>Finding the lesser shrew (<i>Sorex minutus</i>) in the nest of the common hornet (<i>Vespa crabro</i>) in the south-east of Belarus</i>	150
Tsurykau A.G., Golubkov V. V., Persson P.-E., Thell A. <i>The red-listed <i>Cetrelia cetrarioides</i> (Parmeliaceae) is confirmed by molecular data in Belarus</i>	152

Биология

УДК 575.17:599.9

Полиморфизм гена дофаминового рецептора DRD4 связанного с переносом дофамина в нейронных структурах

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО, В.Д. РУМЯНЦЕВА, С.А. ЗЯТЬКОВ

В ходе исследования были сконструированы оптимальные праймеры, разработана линейка параметров ПЦР-анализа и электрофоретического фракционирования минисателлитных аллелей гена DRD4 в буккальном материале человека. Наиболее частым в исследованной выборке оказался аллель 4R, аллели 2R и 7R встречались с низкой частотой.

Ключевые слова: ДНК, ген DRD4, экзон 3, минисателлиты.

In the research optimal primers were constructed and the parameters for PCR and electrophoretic analysis of minisatellite alleles of the DRD4 gene in human bucal cells were described. The most frequent in the samples was the 4R allele, the 2R and 7R alleles with low frequency were found.

Keywords: DNA, gene DRD4, exzon 3, minisatellites.

Введение. Изучение генетического полиморфизма в системе генов, участвующих в регуляции важных поведенческих признаков, связанных с ассоциативным поведением, представляет большой интерес с точки зрения когнитивной биологии, медицинской и популяционной генетики. Значительную роль в регуляции поведения у людей разных возрастных групп, отводится **дофаминовой нейромедиаторной системе мозга**. Дофамин является важнейшим нейромедиатором, участвующим в передаче сигналов в мозге. Передача осуществляется с помощью специальных **белковых рецепторов**, которые, связываясь с дофамином, позволяют проводить сигнал по нейронному пути.

В настоящее время известно более 15 генов-кандидатов нейротрансмиттерных систем, ассоциированных с различными поведенческими признаками [1], [2]. Одним из наиболее важных в данной системе является **ген дофаминового рецептора DRD4**, связанного с переносом дофамина в нейронных структурах.

В связи с этим целью нашего исследования было разработать методы ПЦР-анализа с последующим электрофоретическим фракционированием для выявления различных аллелей гена DRD4 в буккальном материале человека.

Характеристика и действие гена DRD4. В ходе исследований, проведенных еще в начале 90-х гг. 20 в., было установлено, что ген дофаминового рецептора D4 (DRD4) человека расположен в хромосоме 11 рядом с теломерой, в сегменте 11p15.5 (рисунок 1) [3].

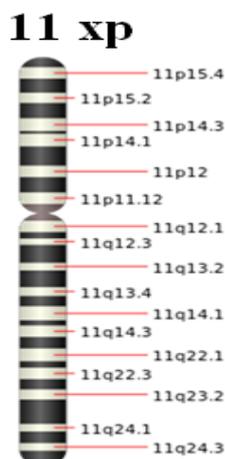


Рисунок 1 – Локализация гена DRD4 в хромосоме 11, в сегменте 11p15.5 [3]

В ряде ключевых работ было проведено клонирование, а также секвенирование гена DRD4. Оказалось, что ген имеет размер 3438 н.п. и состоит из 4 экзонов и 3 интронов [4], [5]. Структура гена дофаминового рецептора D4 хорошо видна на рисунке 2 [6].

Рисунок 2 – Структура гена дофаминового рецептора D4 [6]

Рецепторный белок, кодируемый геном DRD4, состоит из 387 аминокислот и включает в себя 7 трансмембранных доменов, а также три цитоплазматические петли [5]. Пространственная третичная структура белкового рецептора D4 представлена на рисунке 3 [7].

Необходимо подчеркнуть важный момент, заключающийся в том, что ген DRD4 содержит в третьем экзоне минисателитный тандемный повтор (VNTR – variable number tandem repeat) величиной 48 н.п. Этот минисателит может повторяться в популяциях людей от 2 до 11 раз. При этом наиболее распространенными *версиями* являются повторы 2(2R), 4 (4R) и 7 (7R) [6].

Установлено, что аминокислоты, кодируемые повторами в 48 н.п., находятся в третьей цитоплазматической петле белка рецептора и таким образом, имеется три различных формы этого рецептора, которые различаются по длине третьей цитоплазматической петли (рисунок 3). Предполагается, что изменение длины цитоплазматической петли влияет на функцию рецептора D4.

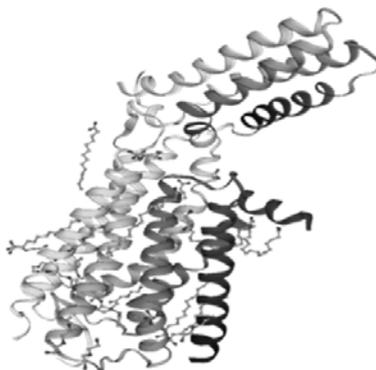


Рисунок 3 – Третичная структура дофаминового рецепторного белка D4. Три цитоплазматические петли расположены в верхней части рисунка [7]

Выявления различных аллелей гена DRD4. Выделение тотальной ДНК из буккального материала человека проводилось с помощью упрощенного СТАВ-метода, описанного ранее [8], [9].

Ниже представлен фрагмент нуклеотидной последовательности экзона 3 гена DRD4 (GenBank, NC_000011.10) [10] с указанием места расположения минисателита 48 н.п. Используя данную нуклеотидную последовательность, нами была сконструирована оптимальная пара праймеров, позволяющая амплифицировать минисателит с фланкирующими участками.

```

2581 cttcttccta ccctgcccgc tcatgctgct gctctactgg gccacgttcc gcggcctgca
2641 gcgctgggag gtggcacgtc gcgccaagct gcacggccgc gcgccccgcc gacccagcgg
2701 ccctggcccc ccttccccc cgccaccgcg gccccgcctc ccccaggacc cctgcgggcc
2761 cgactgtgcg ccccccgcgc ccggccttcc ccgggggtccc tgcggccccg actgtgcgcc
2821 cgccgcgccc agcctcccc aggacccttg cggccccgac tgtgcccccc ccgcgccccg
2881 cctccccccg gacccctgcg gctccaactg tgetcccccc gacgcggtca gagccgcccg
2941 gctcccacc cagactccac cgagaccgag caggaggcgg cgtgccaaaga tcaccggccc
3001 ggagcgcaag gccatgaggg tcctgcccgg ggtggctcgg gggttcctgt cctgaggggg

```

Рисунок 4 – Фрагмент нуклеотидной последовательности экзона 3 гена DRD4 [10]

Структуры прямого и обратного праймеров приведены ниже:

Прямой: 5' - AGGTGGCACGTCGCGCCAAGCTGCA - 3'

Обратный: 5' - TCTGCGGTGGAGTCTGGGGTGGGAG - 3'

В таблице 1 отражены все параметры процесса амплификации фрагмента гена DRD4 с помощью метода полимеразной цепной реакции, используемые в ходе нашего исследования полиморфизма.

Таблица 1 – Параметры амплификации для анализа полиморфного участка ДНК

Стадия	Режим амплификации		Процесс	Число циклов
	Температура, °С	Время, с		
1	95	900	Первичная денатурация ДНК	1
2	94	60	Денатурация ДНК	40
	55	60	Гибридизация праймеров	
	72	90	Элонгация	
3	72	600	Финальная элонгация	1

Электрофоретическое фракционирование для выявления различных минисателитных аллелей экзона 3 гена DRD4 в буккальном материале человека проводилось в агарозном геле стандартными методами, описанным нами ранее [11]–[13]. Выявление электрофоретических фракций проводилось с помощью красителя этидиум бромид. В результате проведенного исследования было обнаружено 3 минисателитных аллеля. Электрофореграмма, демонстрирующая спектр минисателитных аллелей экзона 3 гена 4-го рецептора дофамина DRD4 после ПЦР-амплификации с праймерами, представлена на рисунке 4.

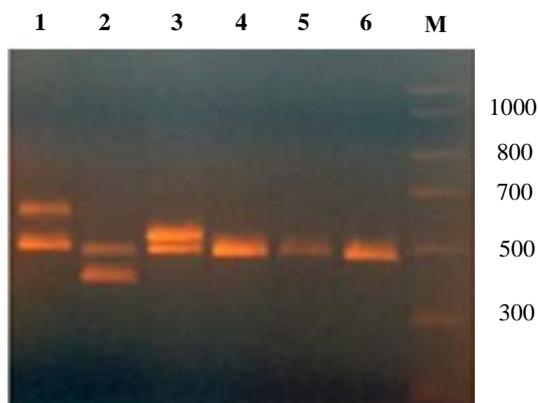


Рисунок 4 – Электрофореграмма минисателитных аллелей экзона 3 гена DRD4 после ПЦР-амплификации с краевыми праймерами у шести человек: 1 – генотип 4R/7R, 2 – 2R/4R, 3 – 4R/5R, 4–6 – 4R/4R, М – маркер масс

Как видно из рисунка 4, наиболее частым в исследованной выборке был аллель 4R (с четырьмя повторами в 48 н.п.). Этот аллель присутствовал в генотипах шести человек, причем у трех (образцы 4–6) в гомозиготном состоянии. Еще два аллеля 7R и 2R были встречены только в гетерозиготных генотипах (рисунок 4).

Таким образом, в ходе нашего исследования были сконструированы оптимальные праймеры, разработана линейка параметров ПЦР-анализа и электрофоретического фракционирования минисателитных аллелей гена DRD4 в буккальном материале человека. Наиболее частым в исследованной выборке оказался аллель 4R (с четырьмя повторами 48 н.п.), аллели 2R и 7R встречались с низкой частотой.

Работа проводилась в рамках темы ГПНИ 21-14 Государственной программы «Природные ресурсы и окружающая среда» и гранта Министерства образования РБ 2021 года для аспирантов и студентов.

Литература

1. Алфимова, М. В. Генные основы темперамента и личности / М. В. Алфимова, В. И. Трубников // Вопросы психологии. – 2000. – № 3. – С. 128–139.
2. Kim, Y.-K. Handbook of Behavior Genetics / Y.-K. Kim. – USA, N.Y. : Springer Science+Business Media LLC, 2009. – 557 p.
3. Gelernter, J. The D4 Dopamine receptor (DRD4) maps to distal 11p close to HRAS / J. Gelernter, J. L. Kennedy, H. H. Van Tol, O. Civelli. // Genomics. – 1992. – V. 13. – P. 208–210.
4. Van Tol, H. H. Cloning of the gene for a human dopamine D4 receptor with high affinity for the antipsychotic clozapine / H. H. Van Tol, J. R. Bunzow, H. C. Guan, R. K. Sunahara, P. Seeman // Nature. – 1991. – Vol. 350 (6319). – P. 610–614.
5. Van Tol, H. H. Multiple dopamine D4 receptor variants in the human population / H. H. Van Tol, C. M. Wu, H.-C. Guan, K. Ohara, J. R. Bunzow // Nature. – 1992. – V. 358. – P. 149–152.
6. Ding, Y. C. Evidence of positive selection acting at the human dopamine receptor D4 gene locus / Y. C. Ding, H. C. Chi, D. L. Grady // PNAS. – 2002. – Vol. 99 (1) – P. 309–314.
7. BIOZENTRUM [Electronic resource] : University of Basel. The Center for Molecular Life Sciences. – Mode of access : <https://swissmodel.expasy.org/repository/uniprot/P21917>. – Date of access : 20.08.2019.
8. Великов, В. А. Молекулярная биология. Практическое руководство / В. А. Великов. – Саратов : Саратовский источник, 2013. – 84 с.
9. Маниатис, Т. Методы генетической инженерии. Молекулярное клонирование / Т. Маниатис, Э. Фрич, Дж. Сэмбрук. – М. : Мир, 1984. – 480 с.
10. NCBI [Electronic resource] : National Center for Biotechnology Information Search database. – Mode of access : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/NC_000011.10?report=genbank&from=637269&to=640706. – Date of access : 20.03.2021.
11. Knoblauch, A. The binding of Mss4 to α -integrin subunits regulates matrix metalloproteinase activation and fibronectin remodeling / A. Knoblauch, G. Goncharenko, S. Ludwig, V. Wixler // FASEB Journal. – 2007. – № 2. – P. 497–510.
12. 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. – DOI 10.1038.
13. Зятыков, С. А. Оптимальные параметры ПЦР-анализа возбудителей диплостомоза / С. А. Зятыков, Е. М. Курак, Г. Г. Гончаренко // Наука, техника и образования. – 2015. – № 11 (17). – С. 15–17.

УДК 535.231.16:599(476.2)

Динамика мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на территории радиоактивного загрязнения

А.В. Гулаков, Д.Н. Дроздов

Вне зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории местообитания наблюдается высокая вариация поглощенной дозы внутреннего облучения диких животных, которая сохраняется в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. Мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на стационарах с разной плотностью радиоактивного загрязнения, имеют достоверные различия. Сравнительный анализ доз облучения видов, рекомендованных ICRP в качестве референтных, показал, что уровень мощности поглощенной дозы внутреннего облучения за весь период наблюдений либо не превышает производный референтный уровень, либо имеются единичные случаи превышения.

Ключевые слова: дикие млекопитающие, мощность дозы, цезий-137, мышечная ткань.

Regardless of the level of radioactive contamination of the habitat, there is a high variation in the absorbed dose of internal irradiation of wild animals, which persists in the remote period after the Chernobyl accident. The rates of the absorbed dose of internal irradiation of large mammals living in permanent study area with different density of radioactive contamination have significant differences. Comparative analysis of radiation doses of the types recommended by ICRP as a reference showed that the level of the absorbed dose of internal radiation for the entire observation period either does not exceed the derived reference level, or there are isolated cases of excess.

Keyword: wild mammals, dose rate, cesium-137, muscle tissue.

Введение. В 108 публикациях МКРЗ декларировано о том, что современная концепция радиационной защиты не может ограничиваться только безопасностью человека, в ней должна быть учтена возможность перехода от антропоцентрического к экоцентрическому подходу [1]. Положения этой концепции аргументированы в научных работах F. Brechignas, D. Delistraty, R.J. Pentreath, P.M. Алексахин, С.В. Фесенко и др. [2]–[9]. В соответствии с экоцентрическим подходом радиологические эффекты у биоты могут возникать из-за путей облучения, не имеющих аналогов для человека. При этом радиационная защита биоты, как и защита человека, строится на требовании соблюдения референтного и предельного уровня дозы облучения. Этот уровень устанавливается по ожидаемому отрицательному эффекту или затратам, которые потребуются на проведение защитных мероприятий [10]. В рамках концепции радиационной защиты в отношении биоты предложена репрезентативная выборка из 12 животных и растений (RAPs). Референтная группа составлена на основании общности таксона «семейство», где уровень радиобиологического отклика можно считать относительно постоянным. Для RAPs группы предложены референтные уровни (DCRLs) – диапазоны мощностей поглощенной дозы, в пределах которых существует вероятность вредных эффектов от ионизирующего излучения. DCRLs используются для оценки затрат на защиту окружающей среды в разных ситуациях облучения (планируемого, аварийного, существующего) [11]. Выбор референтных организмов основан на ряде критериев: положение в экосистеме, доступность для мониторинга, радиочувствительность. В настоящее время среди референтных организмов крупные наземные млекопитающие представлены только семейством *Cervidae* и видами *Alces alces*, *Capreolus capreolus*, *Cervus elaphans*, *Odocoileus hemionus*, *Odocoileus virgianus*.

В докладе ICRP (Carl-Magnus Larsson, Seoul, 2015) для семейства *Cervidae* диапазоны мощностей поглощенной дозы, в пределах которых существует вероятность вредных эффектов, определены в интервале 0,1–1 мГр/сут [10]. В рамках европейского проекта PROTECT 2000–2008 гг. предложено распределение чувствительности видов и определены величины безопасного порога облучения биоты. Для крупных млекопитающих скрининговая величина,

предназначенная для первичной оценки безопасности, определена на уровне 10 мкГр/ч , или $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Гр/сут}$. В случае, когда нижняя граница облучения не превышает скрининговый уровень, ситуацию можно считать безопасной [11].

Уникальной территорией для ведения многолетних наблюдений, которые будут способствовать развитию методологии радиационной безопасности в отношении биоты, является Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, занимающий 2162 км^2 территории Республики Беларусь. Здесь зарегистрированы 1251 вид растений, 54 вида млекопитающих (в том числе виды референтной группы *Alces alces* и *Capreolus capreolus*), 25 видов рыб, 280 видов птиц [12]. Основными источниками радиоактивного излучения являются радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr , поступление и накопление которых в организме животных в естественной среде происходит без каких-либо ограничений и может влиять на формирование доз облучения выше предельного уровня. Среди крупных наземных позвоночных, обитающих в границах ПГРЭЗ, следует указать вид *Sus scrofa*, уровень удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr и ее динамика в организме которого отличается значительной вариабельностью – от $1,0 \cdot 10^2 \text{ Бк/кг}$ до $6,6 \cdot 10^5 \text{ Бк/кг}$ [13]. В отношении референтных видов *Alces alces* и *Capreolus capreolus*, а также вида *Sus scrofa* накоплен массив данных, позволяющий провести сравнительный анализ динамики мощности поглощенной дозы внутреннего облучения.

В данной связи цель работы состоит в том, чтобы оценить динамику и уровень мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих в постчернобыльский период на основании данных удельной активности мышечной ткани в результате хронического поступления в организм ^{137}Cs .

Объект и методы исследований. Оценку мощности поглощенной дозы проводили в отношении инкорпорированного ^{137}Cs в мышечной ткани крупных млекопитающих, обитающих на территории Полесского радиационно-экологического заповедника. Отбор проб осуществлялся на территории Хойникского, Брагинского и Гомельского районов. Места отбора проб охватили три участка, границы которых находятся в зоне отчуждения (более 555 кБк/м^2), зоне отселения ($185\text{--}555 \text{ кБк/м}^2$) и на территории с плотностью загрязнения менее $37,0 \text{ кБк/м}^2$. Большая часть территории зоны отчуждения и отселения, где производился отбор проб, занята лесными массивами и расположены вблизи населенных пунктов: д. Аревичи, д. Борщевка, д. Дроньки, д. Молочки, д. Погонное, д. Оревичи в Хойникском районе, д. Жердное, д. Пучин, д. Савичи, д. Шейка Брагинского района. Территория пробоотбора расположена в междуречье рек Припять и Днепр на расстоянии $10\text{--}35 \text{ км}$ от Чернобыльской АЭС (рисунок 1).

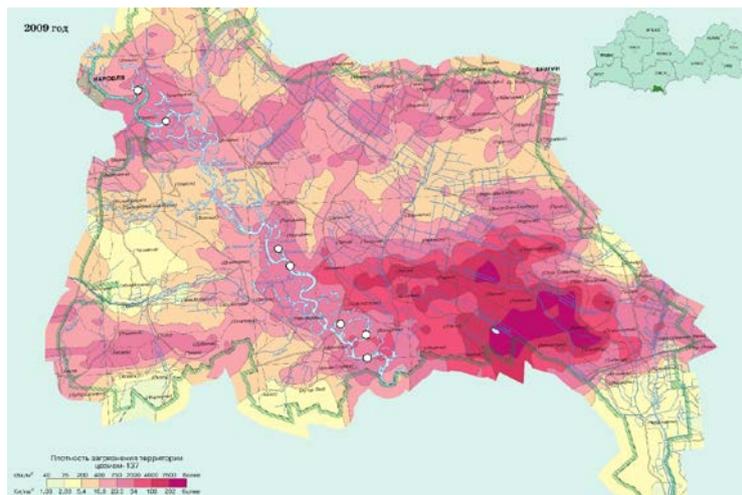


Рисунок 1 – Радиационный режим территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

В качестве контроля использовались данные полученные на участках лесных массивов вблизи д. Васильево, д. Долголесье, д. Кравцовка, д. Прибор в Гомельском районе. Контрольный участок расположен в бассейне реки Днепр и его правого притока р. Сож в 100 км от Чернобыльской АЭС.

Для проведения оценки радиационного режима территории пробоотбора использовались данные плотности поверхностного загрязнения территории ^{137}Cs на момент 1992–2009 гг. и год отбора проб. Данные приведены согласно Каталогу доз облучения жителей Республики Беларусь. Средняя плотность загрязнения территории ^{137}Cs на контрольном участке на год отбора пробы составила 45 ± 10 кБк/м², на участке зоны отселения – 440 ± 70 кБк/м², на участке зоны отчуждения – 1790 ± 200 кБк/м².

Отбор проб и измерение удельной активности проводился в период 1991–2008 гг., в результате получены данные 141 особи *C. capreolus*, 93 особи изъяты на территории зоны отчуждения, 27 – зоны отселения, 21 – на контрольном участке; 117 особей *S. scrofa*, 54 особи были добыты на территории зоны отчуждения, 30 – зоны отселения, 33 – контрольном участке; 103 особи *A. alces*, 66 животных были отстреляны в зоне отчуждения, 28 особей – в зоне отселения и 9 особей – на контрольном участке. От туши брали точечные пробы мышечной ткани по 500 ± 50 грамм, содержание ^{137}Cs в пробах определялось на сырую, естественную массу.

Измерения удельной активности ^{137}Cs проводили на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315 (минимальная измеряемая активность ≥ 2 Бк/кг в геометрии 0,5 л (Маринелли), эффективность регистрации на энергии 661 кэВ – $2,46 \times 10^{-2}$ имп/квант, энергетический диапазон регистрируемого γ -излучения 50–3000 кэВ) и γ -радиометре РКГ-АТ1320А, (МДА – 3,7 Бк/кг, эффективность регистрации – $2,2 \times 10^{-2}$ импульсов/квант). Погрешность измерений не превышала 15 %, разница в показаниях приборов (спектрометра и радиометра) при повторных измерениях не превышала 4 %. При оценке активности допускали, что ^{137}Cs равномерно распределен в мышечной ткани и находится в условиях равновесия, а его концентрация постоянная на протяжении года.

Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения в теле наземных животных рассчитывалась в отношении γ -излучения радионуклидов ^{137}Cs . В расчетах использовали значения коэффициента дозового перехода в зависимости от массы животного согласно [14]. Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs рассчитывали по формуле (1):

$$D(t) = A \times K, \quad (1)$$

где $P(t)$ – мощность поглощенной дозы, мкГр/сутки; A – удельная активность ^{137}Cs в мышечной ткани, Бк/кг; K – дозовый коэффициент, равный мощности дозы, создаваемой 1 Бк/кг ^{137}Cs , мкГр/сутки.

Результаты и их обсуждение. Референтный уровень обеспокоенности (DCRLs) или безопасный порог облучения для крупных млекопитающих равен 0,1–1 мГр/сут, скрининговая величина первичной оценки безопасности определена на уровне 10 мкГр/ч, или $2,4 \cdot 10^{-4}$ Гр/сут. В случае если нижняя граница облучения не превышает скринингового уровня, ситуацию можно считать безопасной. В данном случае мы использовали скрининговый уровень ($2,4 \cdot 10^{-4}$ Гр/сут), считая, что все случаи, когда значения мощности поглощенной дозы внутреннего облучения ниже этой величины, ситуация существующего облучения принимается безопасной. Все случаи превышения могут рассматриваться как потенциально опасные, в соответствии со шкалой радиационных эффектов на биоту [11]. Потенциально опасные мощности поглощенной дозы облучения имеют место преимущественно у *S. scrofa* в течение не только первых десяти лет после аварии, но и в отдаленный период. Максимальная величина мощности поглощенной дозы внутреннего облучения наблюдалась спустя десять лет после аварии и составляла $2,0 \cdot 10^{-3}$ Гр/сут (в 8,3 раза больше скрининговой величины). В зоне отчуждения сохранялась высокая вероятность (более 50 %) эффектов влияющих на заболеваемость и репродуктивную систему дикого кабана. В зоне отселения и на контрольном участке не установлено превышения скрининговой величины. Для вида *C. capreolus* превышение скрининговой величины в течение периода наблюдения зарегистрировано только в зоне отчуждения – в 1994 г. превышение в 2,6 раза, в 2005 г. в 1,6 раза. Для вида *A. alces* за весь период наблюдения не было установлено превышения скрининговой величины ни на одном из участков наблюдения.

В результате анализа данных установлено, что на территории с разным уровнем загрязнения наблюдаются достоверные различия вариации мощности поглощенной дозы. Для вида *S. scrofa* за период наблюдения не удалось получить однородной выборки как по удельной активности ^{137}Cs , так и по мощности поглощенной дозы. На контрольном участке вариация в

среднем составила 37 % разброс значений – от 49 % (1991–92 гг.) до 154 % (1999 г), в зоне отселения – 106 % разброс – от 5 % (1999 г.) до 94 % (2000 г), в зоне отчуждения – 127% разброс – от 8 % (1995 г) до 105 % (1997 г). Для вида *C. capreolus* на контрольном участке вариации в среднем составил 57 %, разброс значений – от 41 % до 87 %, в зоне отселения – 54 %, разброс значений – от 14 % (1995 г) до 117 % (1999 г), среднее значение коэффициента вариации в зоне отчуждения – 105 %, разброс значений – от 17 % (2006 г) до 194 % (1995 г). Для вида *A. alces* на контрольном участке вариация в среднем составила 89 %, в зоне отселения – 99 %, в зоне отчуждения – 105 %, максимум вариации наблюдался в 2003–2004 гг. (137–212 %).

Установлено, что между вариацией мощности поглощенной дозы и ее величиной на территориях с разной плотностью загрязнения имеет место корреляционная зависимость: чем больше плотность загрязнения территории, тем больше вариация дозы, в результате выборка становится менее однородной по дозе облучения ($r = 0,6$, $p < 0,05$). Согласно результатам наблюдений, эта закономерность с годами не изменяется [15].

Можно предположить, что вариация мощности поглощенной дозы в большей степени связана не с фактором плотности загрязнения почвы, а с миграций, пищевым поведением и возможностью поступления ^{137}Cs в организм животных. Методом дисперсионного анализа установлено, что плотность загрязнения составляет не более 25 % вариации мощности поглощенной дозы внутреннего облучения ($p = 0,01$).

Оставшаяся доля вариации связана с пищевой специализацией животных, а также использованием в рационе аккумуляторов ^{137}Cs , таких как грибы и лишайники. В особенности это характерно для вида *S. Scrofa*, экология и структура питания которого тесно связаны с нижним ярусом фито- и зооценоза, животные могут использовать также представителей ихтиофауны. Рассматривая возможность пребывания поголовья дикого кабана в границах зоны отчуждения и широкий ареал обитания, можно утверждать, что дикий кабан – это активный аккумулятор и источник миграции чернобыльских радионуклидов на территории Европы. В то же время экология и структура питания *C. capreolus* и *A. alces* в большей степени связана со средним ярусом лесного фитоценоза и ярусом травяных растений лугов и заброшенных сельхозугодий, для вида *A. alces* следует отметить связь с нижним и средним ярусом прибрежно-водного фитоценоза. На рисунке 2 представлены результаты дисперсионного анализа поглощенных доз внутреннего облучения млекопитающих разных видов, обитающих на территориях с разным радиационным режимом.

Из данных, приведенных на рисунке 2 видно, что достоверно высоким уровнем мощности поглощенной дозы отличается вид *S. scrofa*, средняя мощность дозы внутреннего облучения за период наблюдения в зоне отчуждения составила 330 мкГр/сут. Средняя мощность поглощенной дозы внутреннего облучения в зоне отчуждения вида *C. capreolus* – 136 мкГр/сут, вида *A. alces* – 60 мкГр/сут. Достоверные различия средних значений поглощенной дозы установлены только для территории зоны отчуждения ($p < 0,05$), на контрольном участке и в зоне отселения не установлено достоверного различия между средними значениями доз облучения исследуемых видов.

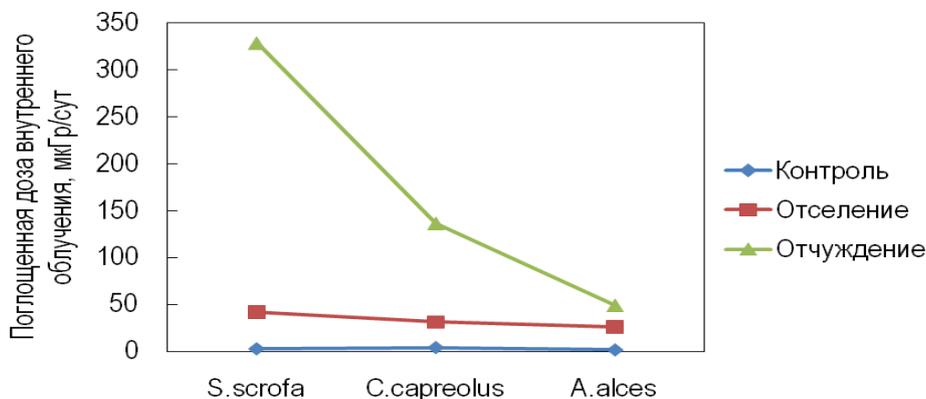


Рисунок 2 – Динамика мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих разных видов

Заключение. В результате анализа данных мощности поглощенной дозы внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на стационарах с разной плотностью радиоактивного загрязнения, имеют достоверные различия.

Среднее значение мощности поглощенной дозы внутреннего облучения вида *S. scrofa* на контрольном участке составляет $3,2 \pm 0,6$ мкГр/сут, на территории зоны отселения – $54,9 \pm 27,9$ мкГр/сут, на территории зоны отчуждения – $330,2 \pm 113,7$ мкГр/сут. Среднее значение мощности поглощенной дозы внутреннего облучения вида *C. capreolus* на контрольном участке составляет $3,7 \pm 1,4$ мкГр/сут, на территории зоны отселения – $34,5 \pm 9,6$ мкГр/сут, на территории зоны отчуждения – $136,0 \pm 77,6$ мкГр/сут. Среднее значение мощности поглощенной дозы внутреннего облучения вида *A. alces* на контрольном участке, составляет $2,4 \pm 0,6$ мкГр/сут, на территории зоны отселения – $23,5 \pm 7,8$ мкГр/сут, на территории зоны отчуждения – $60,8 \pm 9,4$ мкГр/сут.

Таким образом, анализ средних годовых поглощенных доз внутреннего облучения крупных млекопитающих, обитающих на территории ПГРЭЗ, показал, что в соответствие с современными рекомендациями радиационной защиты биоты в отдаленный период после аварии на ЧАЭС важным источником миграции и аккумуляции радионуклидов ^{137}Cs является вид *S. scrofa*. В ходе анализа временной динамики мощности поглощенной дозы внутреннего облучения *S. scrofa* установлено, что в течение 15 лет после аварии в зоне отчуждения сохранялась высокая вероятность слабых эффектов влияющих на заболеваемость и репродуктивную систему данного вида (более 50 %).

Динамика доз облучения вида *S. scrofa* имеет нелинейную зависимость, для которой фактор радиационного загрязнения территории (плотность загрязнения) не может в полной мере объяснить вариацию величины дозы облучения. По всей видимости, определяющим фактором формирования дозы внутреннего облучения вида *S. scrofa* является фактор пищевого поведения и структура рациона животного. Сравнительный анализ доз облучения видов, рекомендованных ICRP в качестве референтных, показал, что уровень мощности поглощенной дозы внутреннего облучения за весь период наблюдений либо не превышает производный референтный уровень, либо имеются единичные случаи превышения.

Литература

1. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants : ICRP Publication 108 // Annals of the ICRP. – 2008. – Vol. 38 (4–6). – P. 242.
2. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р. М. Алексахин [и др.] ; под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. – М. : Экология, 1991. – 400 с.
3. Paramecium aurelia as a cellular model used for studies of the biological effects of natural ionizing radiation / H. Planel [et al.] // Methodology for assessing impacts of radioactivity on aquatic ecosystems. IAEA Tech. rep. ser. № 190. – Vienna : IAEA, 1979. – P. 335–346.
4. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations / P. Andersson [et al.] // NERC/Centre for Ecology & Hydrology. – 2008. – 72 p. – (СЕН Project Number: C03182. PROTECT Project: Deliverable 5).
5. Brechignac, F. Protection of the environment: how to position radioprotection in an ecological risk assessment perspective / F. Brechignac // The Science of the Total Environment. – 2003. – № 307. – P. 35–54.
6. Delistraty, D. Radioprotection of nonhuman biota / D. Delistraty // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – № 99. – P. 1863–1869.
7. Pentreath, R. J. Ethics, genetics and dynamics: an emerging systematic approach to radiation protection of the environment / R. J. Pentreath // J. Environ. Radioact. – 2004. – № 74. – P. 19–30.
8. Алексахин, Р. М. Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы / Р. М. Алексахин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – № 44 (1). – С. 93–103.
9. Савкин, М. Н. Взаимное влияние объектов живой природы и пунктов захоронения радиоактивных отходов: экологическая и техническая безопасность / М. Н. Савкин, М. В. Ведерникова, С. В. Панченко // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 3 (4). – С. 30–38.
10. Larsson, С.-М. Protection of the Environment. Activities of Committee 5 : third ICRP Symposium, Seoul, Korea, 20–22 October 2015 / С.-М. Larsson ; Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. – Korea, 2015. – 18 p.

11. Крышев, И. И. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 / И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22, № 1 – С. 47–61.

12. Воронецкий, Н. Н. Численность и биотопическое распределение диких животных в Полесском радиационно-экологическом заповеднике / Н. Н. Воронецкий [и др.] // Биологическое разнообразие Национального парка «Припятский» и других особо охраняемых природных территорий : сб. науч. трудов, посвящен. 30-летию Национального парка «Припятский» (1969–1999) / Национальный парк «Припятский» ; редкол.: А. В. Углянец (сост. и отв. за вып.). – Туров–Мозырь, 1999. – С. 312–315.

13. Гулаков, А. В. Динамика поглощенной дозы внутреннего облучения мышечной ткани дикого кабана от ^{137}Cs , обитающего в условиях Полесского радиационно-экологического заповедника / А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2019. – № 3 (108). – С. 29–34.

14. Спирин, Е. В. Метод расчета доз облучения животных для оценки последствий загрязнения окружающей среды / Е. В. Спирин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49, № 5. – С. 608–616.

15. Гулаков, А. В. Мощность дозы внутреннего облучения от инкорпорированного ^{137}Cs в мышечной ткани европейской косули, обитающей на территории радиоактивного загрязнения / А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2019. – № 4. – С. 55–61.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 04.01.2021

УДК 631.461:631.445.2:631.445.12:579.22

Сравнительный анализ численности микроорганизмов на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и минерализованном торфянике под влиянием микробных деструкторов

Н.М. ДАЙНЕКО, И.И. КОНЦЕВАЯ, С.Ф. ТИМОФЕЕВ, М.С. КОЗЕЛ

Применение биодеструкторов «Жыцень» и «Полибакт» увеличило в 1,2–4,3 раза численность отдельных полезных групп микроорганизмов в почве по сравнению с участком, где не вносились биопрепараты. Количество аммонифицирующих, целлюлозоразрушающих и олигокарбофильных бактерий при обработке деструкторами пожнивными остатками соломы и корне-пожнивных остатков кукурузы на суглинке было выше, чем на торфянике. Выявлены различия в эффективности биопрепаратов на торфянистой почве по сравнению с минеральной почвой. Внесение на солому препарата «Жыцень» увеличило количество олигонитрофильных бактерий по сравнению с минеральной почвой. При обработке корне-пожнивных остатков кукурузы изучаемыми деструкторами численность фосфатмобилизирующих бактерий была выше, чем на минеральной почве. Это можно отметить и для бактерий усваивающих минеральный азот при обработке остатков кукурузы «Полибакт».

Ключевые слова: микроорганизмы, численность, микробные деструкторы, минерализованный торфяник, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва.

The use of bio-destructors «Zhytsen» and «Polybact» increased the number of individual beneficial groups of microorganisms in the soil by 1,2–4,3 times compared to the site where no biological products were introduced. The number of ammonifying, cellulose-destroying and oligocarbophilic bacteria in the treatment of crop straw residues and corn root-crop residues with destructors on the loam was higher than on the peat bog. Differences in the effectiveness of biologics on peaty soil compared to mineral soil were revealed. The introduction of the drug «Zhytsen» on straw increased the number of oligonitrophilic bacteria in comparison with mineral soil. When processing corn root-crop residues with the studied destructors, the number of phosphate-mobilizing bacteria was higher than in mineral soil. This can also be noted for bacteria that absorb mineral nitrogen when processing the remains of corn «Polybact».

Keywords: microorganisms, abundance, microbial destructors, mineralized peat bog, sod-podzolic light loamy soil.

Введение. Микроорганизмы являются наиболее многочисленными обитателями биосферы, занимающие все доступные для жизни уголки планеты [1]. Они являются продуцентами целого ряда биологически активных веществ, таких как белки, липиды, полисахариды, органические кислоты, ферменты, витамины и др. [2].

Микрофлора почвы по количественному и видовому составу значительно колеблется в зависимости от химического состава почвы, ее физических свойств, реакции pH, влагоемкости, степени аэрации [3].

Структура микробных комплексов изменяется во времени, при этом наблюдаются как сезонная динамика микроорганизмов (разная для различных физиологических групп), так и сукцессионные изменения, направленность которых определяется многочисленными факторами [4].

Изучение взаимодействия растений и микроорганизмов имеет в настоящее время особую актуальность, поскольку резкое сокращение минеральных и органических удобрений, средств защиты растений в связи с экономическим кризисом ставит необходимость поиска дополнительных источников азотного питания растений [5]. Одним из основных приемов регулирования деятельности агрономически ценных полезных почвенных организмов является, в частности, применение микробных биопрепаратов «Полибакт» и «Жыцень» [6], [7].

Объекты и методика исследований. Исследования выполняли в 2019–2020 гг. на землях агрокомбината «Южный» вблизи н.п. Поколюбичи Гомельского района Гомельской области. Объектом исследований являлась биологическая активность агрономически полезных групп микроорганизмов при обработке микробными биопрепаратами «Жыцень» и «Полибакт» корне-пожнивных остатков кукурузы и пожнивных остатков соломы.

Комплексный микробный препарат «Полибакт», который мы применяли в своих исследованиях, восстанавливает микробоценоз почвы и повышает урожайность сельскохозяйственных культур, разработан в Институте микробиологии НАН РБ. «Полибакт» стимулирует жизнедеятельность микроорганизмов основных эколого-трофических групп, ускоряет процессы минерализации растительных остатков в почве. Характеризуется фитопротекторным, ростстимулирующим, деструктивным, фосфатмобилизующим и азотфиксирующим свойствами. Экологически безопасен [6].

Комплексный микробный препарат «Жыцень», которым мы обрабатывали пожнивные остатки соломы и корне-пожнивные остатки кукурузы, разработан на кафедре генетики БГУ. Он применяется для разложения стерни и соломы, подавления патогенной микрофлоры и подготовки почвы к посевам. Препарат «Жыцень» одновременно является комплексным микробным удобрением, предназначенным для повышения урожайности зерновых культур (озимых и яровых) и улучшения качества почвы. Препарат «Жыцень» представляет собой мутную жидкость темно-коричневого цвета со специфическим запахом. Основным показателем качества препарата служит титр жизнеспособных клеток, который должен быть не менее 1×10^9 КОЕ для каждого штамма [8].

Опыт I был заложен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве:

- 1) контроль – без обработки пожнивных остатков кукурузы и соломы микробными биопрепаратами «Жыцень» и «Полибакт»;
- 2) обработка пожнивных остатков кукурузы микробным биопрепаратом «Жыцень»;
- 3) обработка пожнивных остатков соломы микробным биопрепаратом «Жыцень»;
- 4) обработка пожнивных остатков кукурузы микробным биопрепаратом «Полибакт»;
- 5) обработка пожнивных остатков соломы микробным биопрепаратом «Полибакт».

Опыт II был заложен на минерализованном торфянике:

- 1) контроль – без обработки пожнивных остатков кукурузы и соломы микробными биопрепаратами «Жыцень» и «Полибакт»;
- 2) обработка пожнивных остатков кукурузы микробным биопрепаратом «Жыцень»;
- 3) обработка пожнивных остатков соломы микробным биопрепаратом «Жыцень»;
- 4) обработка пожнивных остатков кукурузы микробным биопрепаратом «Полибакт»;
- 5) обработка пожнивных остатков соломы микробным биопрепаратом «Полибакт».

Площадь опытных участков составляла 5 м^2 , размещение рандомизировано: повторность опытов – 4-х кратная. Растительные остатки соломы и кукурузы измельчали на фракции 30–50 мм и равномерно распределяли по опытным участкам. Затем растительные остатки обрабатывали микробными биопрепаратами «Жыцень» и «Полибакт» из расчета 300 л/га биопрепарата. Заделку измельченных растительных остатков проводили сразу же после обработки биопрепаратами на глубину 5–7 см, но не глубже 10 см дисковыми орудиями.

Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [8], [9].

Для оценки влияния препаратов «Жыцень» и «Полибакт» на микробонаселение почвы (зимогенную, олиготрофную, автохтонную группы) использовали чашечный метод Коха, с помощью которого определяли численность аммонифицирующих, амилолитических, олигонитрофильных, олигокарбофильных, автохтонных микроорганизмов на селективных питательных средах: мясопептонном (МПА), крахмало-аммиачном (КАА), среда Эшби, голодном (ГА), нитритном (НА) агарах, соответственно. Все посева проводили в трехкратной повторности.

Численность микроорганизмов определяли в колониеобразующих единицах (КОЕ), пересчитывали на 1 г абсолютно сухой почвы. Полученные данные обработаны статистически [10].

Результаты исследований. Проведенный сравнительный анализ численности агрономически полезных групп на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ) показал, что численность аммонифицирующих бактерий при обработке пожнивных остатков соломы «Полибакт» была в 5 раз выше, а при обработке «Жыцень» в 3,2 раза выше на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, чем на минерализованном торфянике (рисунок 1).

В варианте с обработкой корне-пожнивных остатков кукурузы биопрепаратом «Жыцень» численность бактерий в 6,5 раза выше, а в варианте с «Полибакт» в 2,8 раза оказалась выше на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (рисунок 1). Таким образом, во всех вариантах опыта численность аммонифицирующих бактерий выше на ДПЛП, что свидетельствует об интенсивности процессов аммонификации на этом типе почвы.

Во всех вариантах опыта как на ДПЛП, так и на МТ численность аммонифицирующих бактерий была от 1,5 до 4,5 раза выше, чем в контроле.

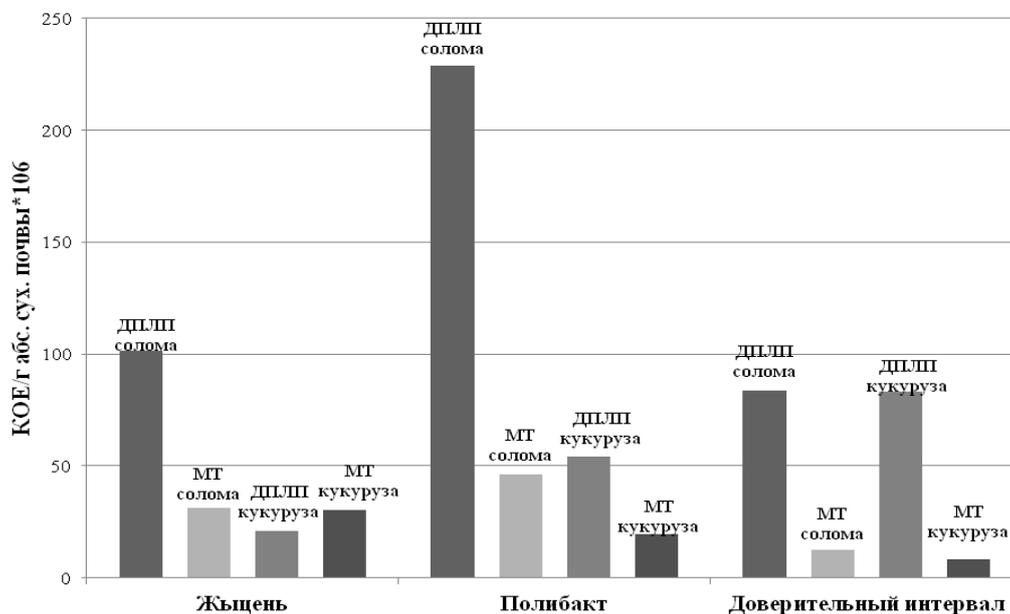


Рисунок 1 – Количество аммонифицирующих бактерий на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ)

При анализе общей численности микроорганизмов, усваивающих минеральный азот (включает бактерии, актиномицеты, микромицеты), в зависимости от варианта опыта, следует отметить, что количество микроорганизмов в варианте с обработкой соломы «Полибакт» в 2,2 раза, а в варианте с «Жыцень» в 2,9 раза выше на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (рисунок 2). В варианте с обработкой корне-пожнивных остатков кукурузы «Полибакт» численность в 2,2 раза, на минеральной почве в варианте с «Жыцень» в 1,5 раза, наоборот, выше на минерализованном торфянике. Во всех вариантах опыта как на ДПЛП, так и на МТ численность бактерий была от 1,5 до 3,7 раза выше, чем в контроле.

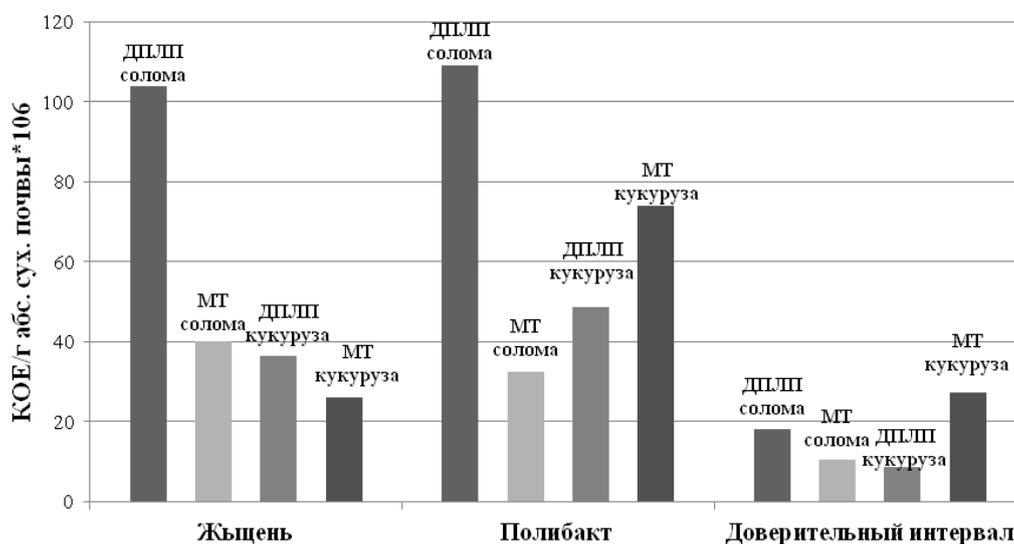


Рисунок 2 – Количество усваивающих минеральный азот – общее количество бактерий на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ)

Анализируя данные по численности олигонитрофильных бактерий видно, что в варианте с обработкой пожнивных остатков соломы «Полибакт» численность в 3,8 раза была больше на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, чем на торфянике; при обработке «Жыцень» в 1,3 раза больше на минерализованном торфянике.

При обработке кукурузы «Жыцень» численность бактерий на минеральной почве оказалась в 1,7 раза, а при обработке «Полибакт» в 2,2 раза больше, чем на торфянике. Во всех вариантах опыта как на ДПЛП, так и на МТ численность бактерий была от 1,2 до 4,3 раза выше, чем в контроле.

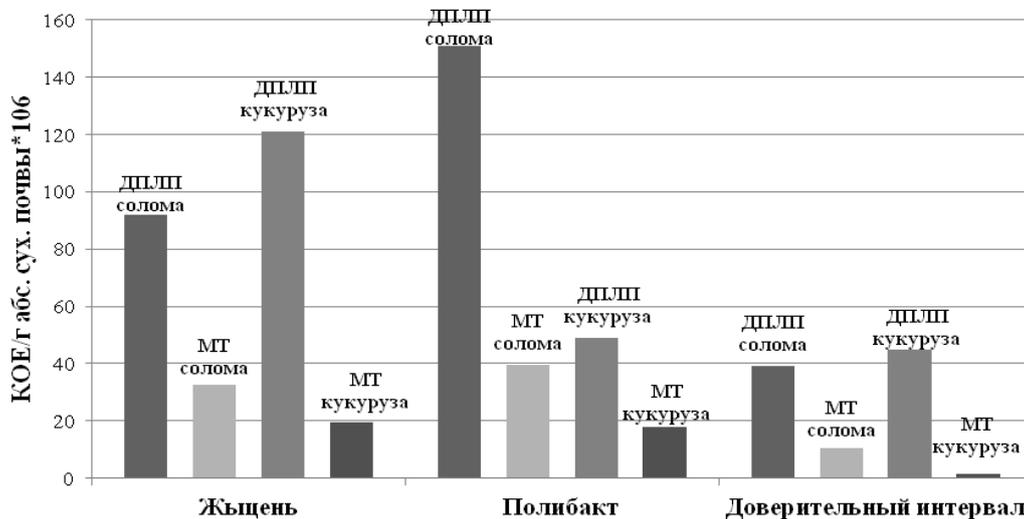


Рисунок 3 – Количество олигонитрофильных бактерий на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ)

Сравнительный анализ численности фосфатмобилизирующих бактерий показал, что при обработке пожнивных остатков соломы «Полибакт», численность бактерий в 1,5 раза, а при обработке «Жыцень» в 1,3 раза оказалась выше на ДПЛП, чем на МТ (рисунок 4).

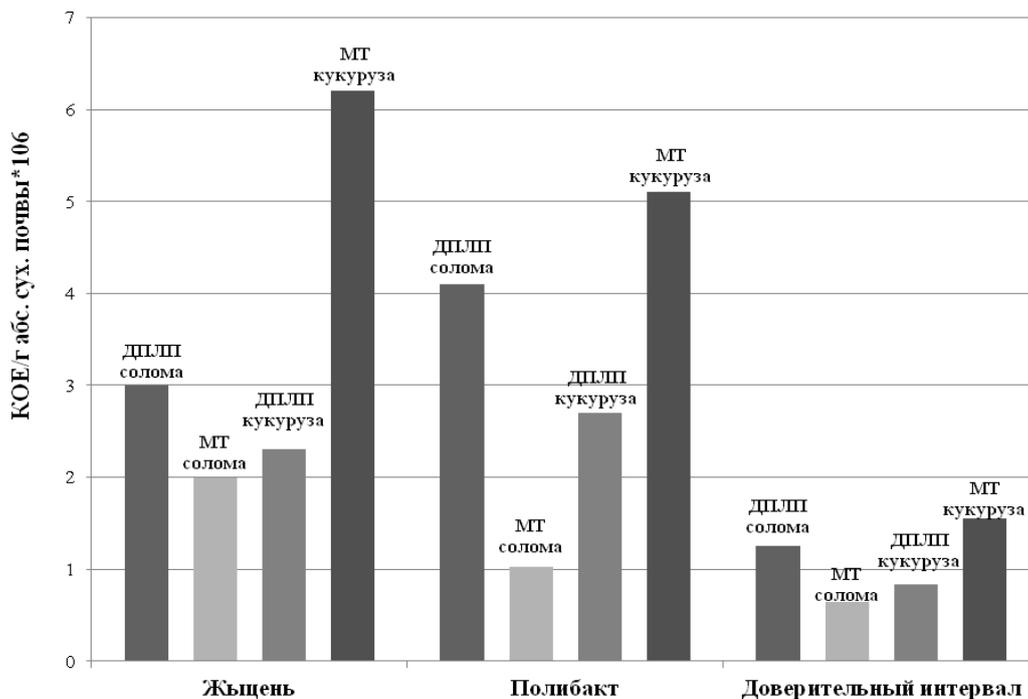


Рисунок 4 – Количество фосфатмобилизирующих бактерий на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ)

Анализируя численность фосфатмобилизующих бактерий при обработке корне-пожнивных остатков кукурузы биопрепаратом «Жыцень», видно, что она в 3,1 раза, а при обработке «Полибакт» в 4,9 раза больше на МТ, чем на ДПЛП. Практически во всех вариантах опыта как на ДПЛП, так и на МТ численность бактерий была от 1,8 до 2,9 раза выше, чем в контроле.

Рассматривая численность целлюлозоразрушающих аэробных бактерий (рисунок 5), видно, что в варианте с обработкой соломы «Полибакт» численность в 7 раз, а при использовании «Жыцень» в 5 раз выше на минеральной почве, чем на торфянистой почве. При обработке корне-пожнивных остатков кукурузы «Жыцень» численность бактерий увеличилась в 3,5 раза, а при обработке «Полибакт» – в 1,7 раза по сравнению с контролем. Во всех вариантах опыта как на ДПЛП, так и на МТ численность бактерий была от 1,3 до 3,1 раза выше, чем в контроле.

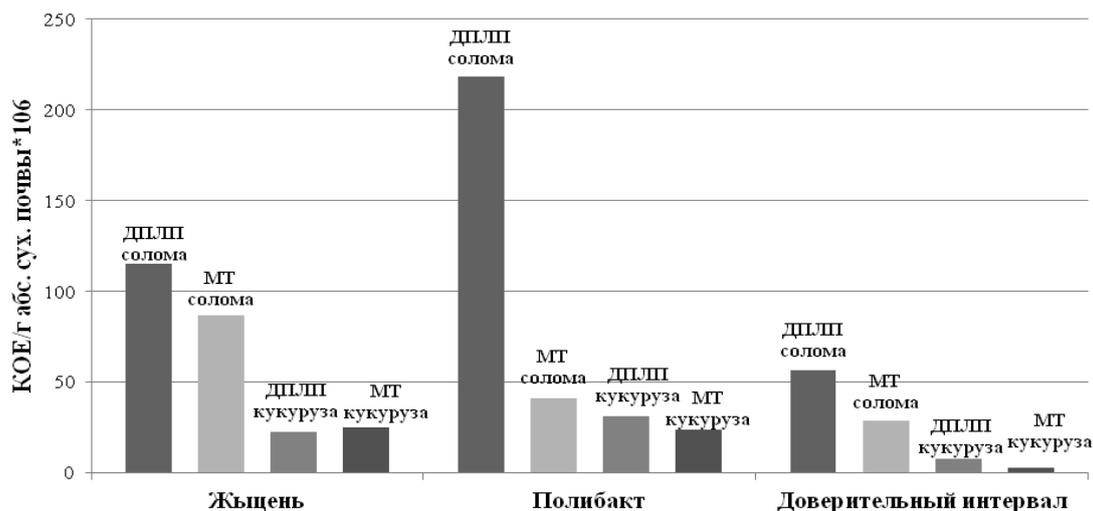


Рисунок 5 – Численность целлюлозоразрушающих аэробных бактерий – общее количество на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ)

Анализируя численность олигокарбофильных бактерий (рисунок 6) в варианте с обработкой пожнивных остатков соломы «Полибакт» видно, что численность в 3,5 раза, а при обработке «Жыцень» в 4,5 раза оказалось выше на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, чем на минерализованном торфянике. При обработке корне-пожнивных остатков кукурузы также наблюдается увеличение численности на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, по сравнению с торфянистой в варианте с «Жыцень» в 3,6 раза, а в варианте с «Полибакт» в 1,8 раза. Во всех вариантах опыта как на ДПЛП, так и на МТ численность бактерий была от 1,3 до 3,4 раза выше, чем в контроле.

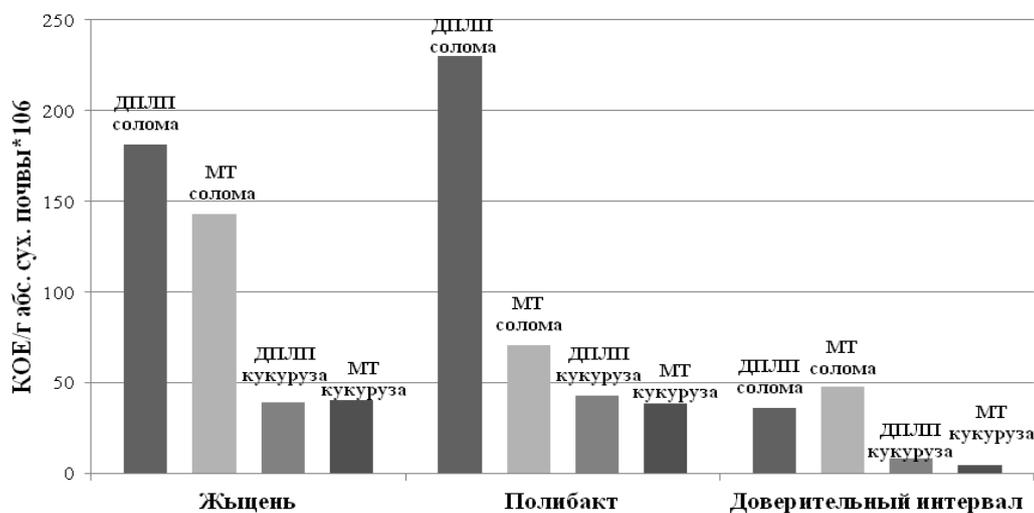


Рисунок 6 – Численность олигокарбофильных бактерий на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ДПЛП) и минерализованном торфянике (МТ)

Заключение. Результаты исследований показали, что микробные биопрепараты увеличивают численность агрономически ценных групп микроорганизмов в почве по сравнению с контролем. Анализ агрономически полезных групп показал, что количество аммонифицирующих бактерий, целлюлозоразрушающих и олигокарбофильных бактерий как при обработке соломы, так и при обработке корне-пожнивных остатков кукурузы на ДПЛП был выше, чем на МТ.

На минерализованном торфянике только количество усваивающих минеральный азот – общее количество бактерий в варианте с обработкой корне-пожнивных остатков кукурузы «Полибакт», количество олигонитрофильных бактерий в варианте с обработкой соломы «Жыцень», количество фосфатмобилизирующих бактерий в варианте с обработкой корне-пожнивных остатков кукурузы «Полибакт» и «Жыцень» было выше, чем на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

Литература

1. Леонтьевская, Е. А. Структура эпифитно-сапротрофных бактериальных комплексов зерновых и овощных культур : дис. канд. биол. наук : 03.02.03 / Е. А. Леонтьевская. – М., 2014. – 89 с.
2. Поликсенова, В. Д. Индуцированная устойчивость растений к патогенам и абиотическим стрессовым факторам (на примере томата) / В. Д. Поликсенова // Вестн. БГУ. – 2009. – № 1. – С. 48–60.
3. Солдатова, И. Э. Экологические функции микроорганизмов почв горных пастбищ / И. Э. Солдатова, Э. Д. Солдатов. – Владикавказ : Северо-Кавказ. науч.-исслед. ин-т горного и предгорного сел. хоз-ва, 2016. – 8 с.
4. Мудрецова, К. А. Микробиология : учебник для университетов / К. А. Мудрецова. – М. : Наука, 1985. – 256 с.
5. Найденов, А. С. Влияние биопрепаратов на численность основных физиологических групп микроорганизмов в почве и урожайность озимой пшеницы / А. С. Найденов, Ф. И. Дерка, Т. А. Рутор, С. С. Терехова // Фундаментальные исследования. – 2008. – №8. – С. 64–66.
6. Институт микробиологии НАН Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mbio.bas-net.by/prod/polybact/>. – Дата доступа : 03.03.2021.
7. Научно-техническая продукция БГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.product.bsu.by/katalog/veschestva-i-materiali/agropromishlennij-kompleks/preparati-dlja-sel-skogo-i-lesnogo-hozjajstva/rastenievodstvo/kompleksnij-mikrobnij-preparat-zhicen_-dlja-razlozhenija-sterni-i-solomi/. – Дата доступа : 03.03.2021.
8. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв / Под ред. Ю. М. Возняковской. – Л. : ВНИИСХМ, 1987. – 47 с.
9. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.
10. Доспехов, Б. А. Практикум по земледелию : учеб. для ун-тов / Б. А. Доспехов, И. П. Васильев, А. М. Туликов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 58 с.

УДК 577.391:517.4; 615.9:533.16

Накопление ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am шляпочными грибами в экосистемах с различным режимом увлажнения зоны отчуждения ЧАЭС

С.А. Калиниченко¹, А.Н. Никитин², О.А. Шуранкова²

Установлены особенности накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am шляпочными грибами на территории зоны отчуждения ЧАЭС. С увеличением степени увлажнения почвы накопление радионуклидов грибами имеет тенденцию к снижению. При этом обнаруживается ряд видовых различий, что связано с особенностями питания гриба и мозаичностью микроклиматических параметров. Установлена взаимосвязь между накоплением радионуклидов грибами и агрохимическими параметрами почвы: содержанием гумуса, ёмкостью поглощения, гидролитической кислотностью, содержанием обменного фосфора, концентрацией подвижных кальция, магния и калия. Эти данные можно использовать при прогнозировании накопления радионуклидов грибами.

Ключевые слова: шляпочные грибы, почва, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , зона отчуждения ЧАЭС.

Features of accumulation ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am in blewits in the territory of exclusion zone of the CNPP are established. With the increase in extent of moistening of the soil, accumulation of radionuclides in mushrooms tends to decrease. At the same time, a number of species differences are found, which is associated with the nutritional characteristics of the fungus and the mosaic nature of microclimatic parameters. The interrelation between accumulation of radionuclides in mushrooms and agrochemical parameters of the soil is established: content of humus, cation exchange capacity, hydrolytic acidity, and content of exchange phosphorus, concentration of mobile calcium, magnesium and potassium. These data can be used for forecasting accumulation of radionuclides in mushrooms.

Keywords: blewits, soil, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , exclusion zone of the CNPP.

Введение. Шляпочные грибы среди потенциальных пищевых продуктов леса обладают наибольшей способностью аккумулировать радионуклиды. Значительная роль при накоплении принадлежит различиям в типах почв и лесорастительных условий, колебаниям уровня грунтовых вод и метеоусловий, сукцессионным процессам и т. д. При этом основным индикатором при поступлении радионуклидов в плодовые тела грибов является изменение содержания в почве микро- и макроэлементов и других агрохимических параметров.

Доаварийное содержание ^{137}Cs в шляпочных грибах на территории южной части Брагинского и Хойникского районов составляло в среднем 130 Бк/кг. Однако это значение могло значительно варьировать в разное время, что обуславливалось как интенсивностью глобальных радиоактивных выпадений, так и существенными видовыми различиями [1].

Содержание радионуклидов в пищевой продукции леса может сильно колебаться в зависимости от таких метеопараметров, как температура и осадки. Одни исследователи утверждают, что в сухих условиях местопроизрастания содержание ^{137}Cs в плодовых телах грибов, произрастающих на почве с высоким валовым запасом данного радионуклида, может быть ниже установленных допустимых уровней. А во влажных дубравах, которые характеризуются богатыми гумусом серыми лесными суглинками, содержание ^{137}Cs в грибах может превышать нормативы даже при плотности загрязнения почвы до 18,5 кБк/м². По другим данным в засушливые годы плодовые тела грибов больше накапливают радионуклидов по сравнению с обычными и дождливыми вегетационными периодами. На уровни аккумуляции радионуклидов также влияет экологическая (трофическая) приуроченность грибов. Тенденция к увеличению накопления проявляется в последовательности: лигнотрофы < гумусовые сапротрофы < подстилочные сапротрофы < микосимбиотрофы [1], [2], [4]–[8].

Как научную, так и практическую значимость играет исследование параметров накопления радионуклидов плодовыми телами грибов. Несмотря на существующие к настоящему времени попытки изучить данные закономерности, многие аспекты этого вопроса либо слабо освещены в научной литературе, либо не затрагивались вовсе. Большинство исследований

посвящено накоплению грибами ^{137}Cs , а сведения о других радионуклидах разрознены и неполны. Наблюдаемое в последние годы на загрязнённых ^{90}Sr территориях возрастает его содержание в компонентах фитомассы и грибах. Поведение же трансураниевых элементов при накоплении их плодовыми телами грибов практически не изучено. Лишь отдельные работы у нас в стране говорят о действительном их поступлении из почвы [3].

Целью наших исследований явилось установление влияния на накопление радионуклидов грибами различных агрохимических параметров и режима увлажнения почвы.

Материалы и методы исследований. Исследования проведены в 2016–2020 гг. на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в белорусском секторе ближней зоны (отчуждения) ЧАЭС в районе исследовательской станции «Масаны» около 12 км от эпицентра аварии. Отбор проб шляпочных грибов проведён на 4-х экспериментальных полигонах, которые охватывали естественные биогеоценозы с различным режимом увлажнения (полугидроморфный, гидроморфный и 2 автоморфных), где для сравнительного анализа были выбраны 7 видов макромицетов, которые встречались на каждой из этих площадок (белый (*Boletus edulis* Bull.), польский (*Boletus badius* (Fr.) Fr.), маслёнок (*Suillus luteus* (L.) Gray), зелёнка (*Tricholoma equestre* (L.) P.Kumm.), лисичка (*Cantharellus cibarius* Fr.), сыроежка (*Russula* sp.), зонтик *Macrolepiota procera* (Scop.) Singer).

Территория экспериментальных полигонов относится к 119–121 кварталам Радинского лесничества. При этом площадка в березняке на гидроморфной почве имела тип лесорастительных условий 1А₃, в остальных биогеоценозах 1А₂ [9]. Почва дерново-подзолистая супесчаная, в увлажнённых биотопах с оторфованным верхним гумусовым горизонтом. Плотность гидроморфной почвы березняка составляла – 0,64 г/см³ (127,4 кг/м²), полугидроморфной почвы березняка – 0,70 г/см³ (140,4 кг/м²), для автоморфной почвы сосняка – 1,62 г/см³ (323,7 кг/м²), для автоморфной почвы березняка – 1,75 г/см³ (351,0 кг/м²). Проективное покрытие экспериментальных полигонов составляло 90–100 %.

С целью определения агрохимических показателей, коэффициентов перехода (K_n) радионуклидов, (Бк/кг:кБк/м²) и накопления (K_n) (Бк/кг:Бк/кг) были отобраны почвенные образцы на каждом экспериментальном полигоне стандартным тростевым пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см, включающие 5 уколов. Одновременно были проведены измерения мощности дозы γ -излучения (МД) на высоте 1 м и 3–4 см от поверхности почвы при помощи дозиметра-радиометра МКС-АТ 1125 (АТОМТЕХ, РБ). В лабораторных условиях пробы почвы высушивали при температуре 20–25°C и гомогенизировали.

Определение ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили инструментальным методом на γ - β -спектрометре «МКС-АТ1315» (Атомтех, Беларусь) с блоком детектирования для регистрации γ -излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI (Т1) размерами $\text{Ø}63 \times 63$ мм. Для регистрации β -излучения использовался органический сцинтиллятор на основе полистирола, активированного паратерфинилом, размерами $\text{Ø}128 \times 9$ мм [10]. Определение ^{241}Am проводили на γ -спектрометре «Canberra» (Canberra Industries, Inc., USA) с детектором из особо чистого германия с композитным углеродным окном с регистрацией γ -излучения в диапазоне энергий 20–2000 кэВ [11]. Ошибка измерений составляла не менее 20 %.

Агрохимический анализ образцов почвы экспериментальных площадок был проведён стандартными методами на базе лаборатории радиэкологии ГНУ «Института радиобиологии НАН Беларуси». Для обработки результатов использованы методы вариационной статистики и корреляционного анализа [12].

Результаты исследований и их обсуждение. В наших исследованиях наибольшим содержанием всех трёх исследуемых радионуклидов отличалась полугидроморфная почва березняка. Наименьшим содержанием ^{137}Cs – гидроморфная почва березняка, ^{90}Sr и ^{241}Am отличалась автоморфная почва сосняка. Причём в ряде случаев имели место несущественные различия в содержании радионуклидов на исследовательских полигонах в березняке на гидроморфной почве, березняке и сосняке на автоморфной почве, что подтверждается статистической обработкой полученных данных. Значительно большее содержание радионуклидов в полугидроморфной почве березняка вероятнее всего связано с мозаичностью чернобыльских

выпадения. В почвах всех исследуемых полигонов наибольшим содержанием отличался ^{137}Cs . Различия между ^{137}Cs и ^{90}Sr соответственно составили для березняка на гидроморфной почве – 3,9 раза, полугидроморфной – 3,0 раза, автоморфной – 9,0 раз, автоморфной почве сосняка – почти 11,0 раз. Различия между ^{137}Cs и ^{241}Am соответственно составили для березняка на гидроморфной почве – 43,1 раза, полугидроморфной – 46,8 раза, автоморфной – 39,8 раза, сосняка на автоморфной почве – 51,6 раза.

В отношении плотности загрязнения экспериментальных полигонов картина несколько изменяется, что связано с морфологией самой почвы. Так, поверхностное загрязнение почвы ^{137}Cs преобладало над другими видами загрязнения для каждого биогеоценоза, но при этом наибольшей плотностью загрязнения обладал березняк на автоморфной почве, также как и в отношении ^{241}Am . Наибольшая плотность загрязнения поверхности почвы ^{90}Sr характерна для березняка на полугидроморфной почве (таблица 1). Данные несоответствия между удельным содержанием радионуклидов в почве и плотностью поверхностного загрязнения связаны как со структурными и биохимическими особенностями почвы, так и с взаимообусловленным режимом увлажнения и активностью биоты.

Таблица 1 – Плотность загрязнения радионуклидами почвы экспериментальных площадок, кБк/м²

Экспериментальные полигоны (n)	Плотность загрязнения, кБк/м ²					
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{241}Am	
	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$ $x_{\min.} - x_{\max.}$	дов. интерв. ($p < 0,001$) $Cs (< 3-5 \%)^*$	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$ $x_{\min.} - x_{\max.}$	дов. интерв. ($p < 0,001$) $Cs (< 3-5 \%)^*$	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$ $x_{\min.} - x_{\max.}$	дов. интерв. ($p < 0,001$) $Cs (< 3-5 \%)^*$
Березняк на гидроморфной почве(6)	$1,22 \pm 0,14$ 0,87–1,74	$0,78-1,66$ 11,05	$0,30 \pm 0,04$ 0,21–0,41	$0,17-0,43$ 13,35	$0,03 \pm 0,003$ 0,02–0,04	$0,02-0,04$ 10,26
Березняк на полугидроморфной почве (100)	$3,45 \pm 0,10$ 1,66–6,32	$3,14-3,76$ 2,75	$1,14 \pm 0,06$ 0,27–3,91	$0,96-1,32$ 4,85	$0,07 \pm 0,002$ 0,03–0,15	$0,06-0,08$ 2,89
Березняк на автоморфной почве (5)	$3,90 \pm 0,21$ 3,43–4,54	$3,23-4,58$ 5,24	$0,43 \pm 0,02$ 0,35–0,46	$0,37-0,50$ 4,87	$0,10 \pm 0,024$ 0,04–0,19	$0,02-0,18$ 24,64
Сосняк на автоморфной почве (100)	$3,49 \pm 0,09$ 1,57–5,82	$3,19-3,78$ 2,58	$0,32 \pm 0,02$ 0,02–2,11	$0,24-0,40$ 7,56	$0,07 \pm 0,002$ 0,002–0,133	$0,06-0,08$ 3,20

* – показатель точности определения выборочной средней.

Различия между плотностью загрязнения поверхности почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr соответственно составили для березняка на гидроморфной почве – 4,1 раза, полугидроморфной – 3,0 раза, автоморфной – 9,1 раза, сосняка на автоморфной почве – 10,9 раза. Различия между ^{137}Cs и ^{241}Am соответственно составили для березняка на гидроморфной почве – 40,7 раза, полугидроморфной – 49,3 раза, автоморфной – 39,0 раза, сосняка на автоморфной почве – 49,9 раза. Несмотря на указанные отличия в выявленных зависимостях между содержанием радионуклидов в почве и плотностью поверхностного загрязнения, полученные особенности с поправкой на почвенные условия в целом согласуются между собой, что говорит о репрезентативности выбора экспериментальных полигонов.

Одним из факторов, определяющих накопление радионуклидов грибами, является их видовая принадлежность. Довольно значительно и внутривидовое варьирование концентрации радионуклидов в грибах, собранных в одном и том же биогеоценозе в пределах даже небольшого участка (до 0,5 га). Вероятно, можно констатировать о заметном влиянии на загрязнённость грибов радионуклидами мозаичности плотности загрязнения почвы в пределах одного биотопа и условий микросреды, в которых они произрастают. Учёными предложена классификация грибов по накопительной способности ^{137}Cs , согласно которой съедобные грибы разделяются на четыре группы: 1) слабонакапливающие: дождевик жемчужный, вешенка, шампиньон, гриб-зонтик пёстрый, строчок обыкновенный, опёнок осенний – Кп до 5; 2) средненакапливающие: подосиновик, подберёзовик, рядовка серая, лисичка настоящая, белый гриб – Кп от 5 до 20; 3) сильнонакапливающие: сыроежки всех видов, груздь чёрный, подгруздок, волнушка розовая, лисичка, подберёзовик, зелёнка – Кп от 20 до 50; 4) аккумуля-

ляторы: моховик, рыжик, маслёнок, козляк, свинушка тонкая, горькушка, колпак кольчатый, польский гриб – $K_p > 50$. В наших исследованиях анализ содержания радионуклидов в грибах также указывает на значительные межвидовые различия, что, наиболее вероятно, связано с особенностями питания и экологии данных видов грибов (рисунок 1, 2).

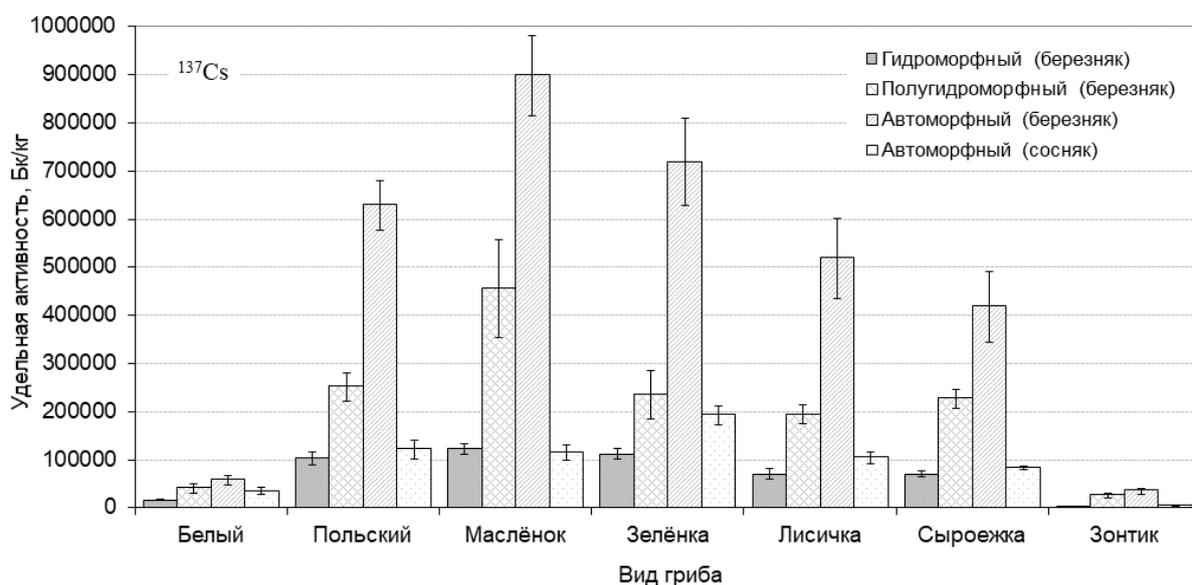


Рисунок 1 – Содержание ^{137}Cs в грибах различных биогеоценозов, Бк/кг

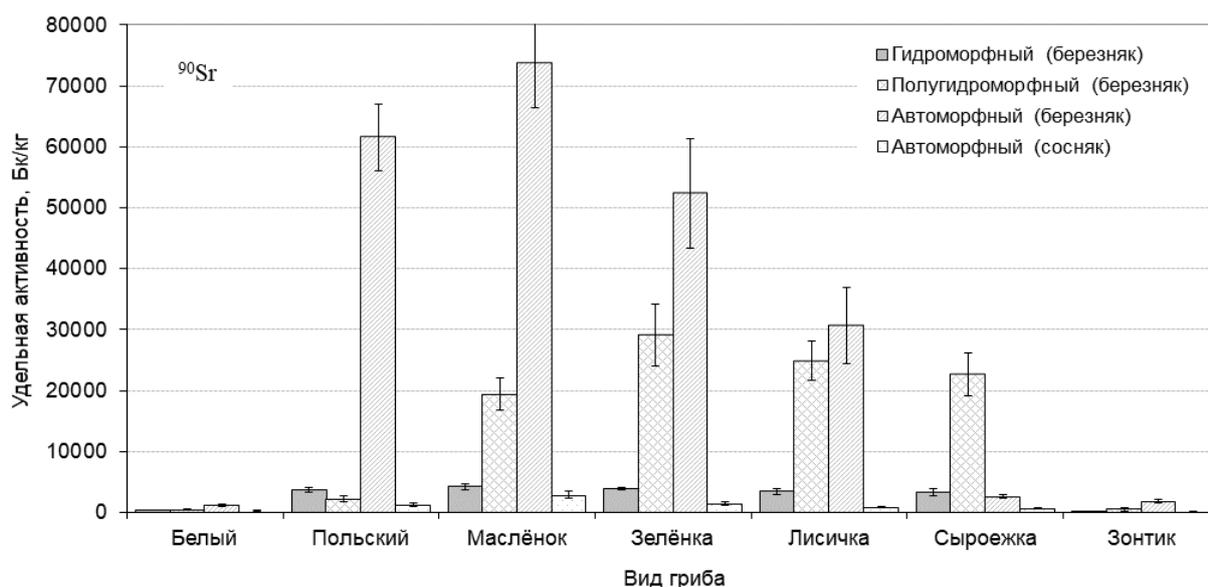


Рисунок 2 – Содержание ^{90}Sr в грибах различных биогеоценозов, Бк/кг

Такие виды, как маслёнок, польский и зелёнка, являлись лидерами по содержанию радионуклидов, независимо от биогеоценоза. Менее всего накапливали радионуклиды белый гриб и зонтик. Различия в накоплении ^{137}Cs между маслёнком и зонтиком на одном исследовательском полигоне составили от 18,4 до 82,5 раз, ^{90}Sr от 28,9 до 39,3 раз. Однако поступление ^{137}Cs в плодовые тела грибов было на порядок выше, чем ^{90}Sr , поскольку большинство из них относится к калияфильным организмам. Существенные отличия нами обнаружены и при анализе влияния режима увлажнения на накопление радионуклидов грибами. Наибольшим удельным содержанием радионуклидов отличались плодовые тела, собираемые в автоморфных условиях берёзового леса. Так, например, различия в удельном содержании радионуклидов в плодовом теле маслёнка, произрастающего на автоморфных почвах березняка и гидроморфных, составляют для ^{137}Cs – 7,3 раза, для ^{90}Sr – 17,6 раза.

Грибы являются осмотрофами – организмами, впитывающими питательные вещества всей поверхностью тела, поэтому их биоаккумуляционная способность очень велика. Анализ *K_p* радионуклидов в плодовые тела съедобных грибов, опубликованных в различных источниках [4]–[8], показывает, что различия в накоплении, например, ^{137}Cs обусловлены принадлежностью грибов к различным экологическим группам: почвенным сапрофитам (организмы, существующие за счёт разрушения отмерших органических остатков), подстилочным сапрофитам, микоризообразователям (грибы, образующие симбиоз мицелия гриба с корнем высшего растения), ксилофитам (живёт на пнях и разлагающихся остатках деревьев), биотрофам (паразитирует на живых растениях). Наименьшие значения *K_p* наблюдаются у таких экологических групп грибов, как подстилочные сапрофиты и ксилофитные паразиты. Максимальной концентрацией характеризуются виды микоризообразователи. Очевидно, это связано с широким варьированием глубины залегания грибного мицелия, а также приуроченностью его к наиболее загрязнённым слоям органоминеральной толщи почв. Согласно полученным нами данным, наибольшими величинами накопления как для ^{137}Cs , так и для ^{90}Sr отличались грибы, произрастающие на территории более сухого биогеоценоза берёзового леса, независимо от различий в плотности радиоактивного загрязнения поверхности почвы.

С увеличением степени увлажнения почвы накопление радионуклидов грибами имеет тенденцию к снижению. При этом обнаруживается ряд видовых различий, что связано с особенностями питания гриба и мозаичностью микроклиматических параметров. Это подтверждается существенной вариабельностью удельного содержания радионуклидов в пределах одного экспериментального полигона, которая для одного вида гриба может составлять 3–5 раз. Проведённый нами статистический анализ подтверждает данные особенности высокими величинами стандартного отклонения и ошибкой среднего. Не соответствуют обнаруженной тенденции грибы, произрастающие на автоморфной почве соснового леса, что связано с особенностями структурной организации данного биогеоценоза, имеющего мощную подстилку, значительно влияющую на перераспределение влаги и питательных элементов в поверхностном слое почвы. При этом следует учитывать то обстоятельство, что основная масса мелких сосущих корней, на которых образуется микориза, располагается именно в подстилке и верхнем 5-см слое почвы, где сосредоточена большая часть радионуклидов.

Необходимо сделать акцент, что максимальные риски превышения установленной нормативной (РДУ-99) концентрации ^{137}Cs в свежих грибах (370 Бк/кг) для наших экспериментальных площадок составляют до 1000 и более раз, независимо от условий увлажнения. Хотя не существует в Беларуси нормативных требований к содержанию в грибах других радионуклидов, можно не сомневаться, что и они были бы значительно превышены.

В отношении ^{241}Am большинство полученных нами данных находились ниже уровня детектируемости. Анализ единичных имеющихся данных содержания ^{241}Am в грибах позволил рассчитать коэффициенты перехода лишь для некоторых видов, что не отражает общей тенденции накопления.

При анализе выноса радионуклидов шляпочными грибами не наблюдается увеличения накопления радионуклидов плодовыми телами при увеличении гидроморфизма почвы биогеоценоза. При этом количество содержания радионуклидов в почве значимого влияния на поступление их в грибы не оказывает. Обращает внимание в ряде случаев высокая корреляция между поступлением ^{137}Cs и ^{90}Sr в плодовые тела грибов.

Анализ коэффициентов накопления и перехода также подтверждает, что максимальной накопительной способностью выделяются в наших исследованиях маслёнок, зелёнка и гриб польский. Эти виды грибов можно использовать в качестве биоиндикатора радиоактивного загрязнения лесов. Известно, что даже на относительно чистой территории (0,1 Ки/км²) данные грибы накапливают радионуклиды значительно выше допустимых норм (370 Бк/кг). Возможно, что по мере миграции радионуклидов в более глубокие почвенные слои, в ряду накопления грибов могут происходить перестановки и максимальным накоплением станут характеризоваться другие виды.

В результате длительных наблюдений установлено, что многолетняя динамика накопления ^{137}Cs грибами может меняться в зависимости от физико-химической природы радиоактивных выпадений; климатических и экологических условий (типа почвы и особенностей

строения подстилки), а также видовых различий грибов, в частности глубины распространения мицелия [1]. По вопросу многолетней динамики содержания ^{137}Cs в грибах существует две точки зрения. По мнению одних исследователей, концентрация радионуклида в грибах со временем очень медленно уменьшается, по мнению других – остаётся почти неизменной, с незначительными вариациями по годам, поскольку радионуклиды аккумулируются в мицелии. С нашей точки зрения все эти динамические колебания можно отследить лишь при глобальных или невысоких техногенных выпадениях. При тех уровнях поверхностного загрязнения почвы, которые сформировались вследствие чернобыльских выпадений в ближней зоне ЧАЭС, эти колебания в любом случае будут нивелироваться сложившимися условиями.

При изменении режима увлажнения сообщества изменяется ряд параметров связанных в почве с органической компонентой, среди которых нами были проанализированы: содержание гумуса, гидролитическая кислотность и ёмкость поглощения.

Анализ показывает, что при снижении содержания гумуса в почве, ёмкости поглощения и гидролитической кислотности по мере уменьшения влажности почвы биогеоценоза происходит увеличение накопления радионуклидов грибами. Видимо биологические особенности данного объекта исследований имеют первостепенное значение при поступлении радионуклидов в ткани его организма.

Особенностью наших экспериментальных полигонов явилось закономерное снижение концентрации практически всех элементов питания в почве в зависимости от снижения её гидроморфизма, за исключением фосфора. Почва самого сухого биогеоценоза – березняка автоморфного содержала в 4–5 раз больше фосфора, чем березняка гидроморфного. Наиболее вероятно, что низкое содержание доступных для питания гриба калия, кальция и магния в верхнем почвенном слое автоморфного березняка и послужило стимулом для интенсивного всасывания радиоактивных аналогов данных элементов. К тому же имеет место значительная конкуренция за почвенное питание со стороны живого напочвенного покрова.

Заключение. В результате проведённых исследований нами было установлено ряд особенностей накопления радионуклидов шляпочными грибами на территории зоны отчуждения ЧАЭС. Одним из факторов, определяющих накопление радионуклидов грибами, является их видовая принадлежность. Довольно значительно и внутривидовое варьирование концентрации радионуклидов в грибах, собранных в одном и том же биогеоценозе. Можно констатировать и о заметном влиянии на загрязнённость грибов радионуклидами мозаичности плотности загрязнения почвы в пределах одного биотопа и условий микросреды, в которых они произрастают. Такие виды как маслёнок, польский и зелёнка являлись лидерами по содержанию радионуклидов, независимо от биогеоценоза, в котором они произрастали. Менее всего в наших исследованиях накапливали радионуклиды белый гриб и зонтик. Различия в накоплении ^{137}Cs между маслёнком и зонтиком на одном исследовательском полигоне составили от 18,4 до 82,5 раз, ^{90}Sr от 28,9 до 39,3 раз.

Поступление ^{137}Cs в плодовые тела грибов было на порядок выше, чем ^{90}Sr , в связи с их калияфильными свойствами. Наибольшим удельным содержанием радионуклидов отличались плодовые тела, собираемые в автоморфных условиях берёзового леса, несмотря на противоречивость литературных данных по этому вопросу. Так, различия в удельном содержании радионуклидов в плодовом теле маслёнка, произрастающего на почвах березняка автоморфного и березняка гидроморфного, составляют для ^{137}Cs – 7,3 раза, для ^{90}Sr – 17,6 раза.

Наибольшими коэффициентами накопления и перехода как для ^{137}Cs , так и для ^{90}Sr также отличались грибы, произрастающие на территории более сухого биогеоценоза берёзового леса, независимо от различий в плотности радиоактивного загрязнения поверхности почвы. С увеличением степени увлажнения почвы накопление радионуклидов грибами имеет тенденцию к снижению. При этом обнаруживается ряд видовых различий, что видимо, связано с особенностями питания гриба и мозаичностью микроклиматических параметров.

Анализ максимальных рисков превышения установленной нормативной (РДУ-99) концентрации ^{137}Cs в свежих грибах (370 Бк/кг) для наших экспериментальных площадок обнаружил их превышение до 1000 и более раз, не зависимо от условий увлажнения. Хотя не существует в Беларуси нормативных требований к содержанию в грибах других радионукли-

дов, можно не сомневаться, что и они были бы значительно превышены. В отношении ^{241}Am все полученные нами данные находились ниже уровня детектируемости, поэтому, анализируя их, можно говорить о полученных закономерностях лишь как о тенденции.

При снижении содержания гумуса в почве, ёмкости поглощения и гидролитической кислотности по мере уменьшения влажности почвы биогеоценоза происходит увеличение накопления радионуклидов грибами. Особенностью наших экспериментальных полигонов явилось закономерное снижение концентрации практически всех элементов питания в почве в зависимости от снижения её гидроморфизма, за исключением фосфора. Наиболее вероятно, что низкое содержание доступных для питания гриба калия, кальция и магния в верхнем почвенном слое автоморфного березняка и послужило стимулом для интенсивного всасывания радиоактивных аналогов данных элементов.

Литература

1. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС : состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В. А. Ипатьев, В. Ф. Багинский, И. М. Булавик [и др.] ; под общ. ред. В. А. Ипатьева. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 1999. – 454 с.
2. Алексахин, Р. М. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах / Р. М. Алексахин, М. А. Нарышкин. – М. : Наука, 1977. – 144 с.
3. Шуранкова, О. А. Плодовые тела грибов, как накопители трансураниевых элементов / О. А. Шуранкова, О. И. Попова, А. Н. Никитин, С. А. Калиниченко // Сахаровские чтения 2014 года : экологические проблемы XXI века: материалы 14-й межд. науч. конф. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2014. – С. 186.
4. Переволоцкий, А. Н. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах / А. Н. Переволоцкий. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2006. – 255 с.
5. Кучма, Н. Д. Радиэкологические и лесоводственные последствия загрязнения лесных экосистем зоны отчуждения / Н. Д. Кучма, Н. П. Архипов, И. С. Федотов. – Чернобыль, 1994. – 53 с.
6. Булавик, И. М. Анализ многолетней динамики накопления радионуклидов в лесной продукции / И. М. Булавик, А. Н. Переволоцкий. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 1995. – С. 88–95.
7. Щеглов, А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах : по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС / А. И. Щеглов. – М. : Наука, 1999. – 268 с.
8. Щеглов, А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах центральных районов Восточно-Европейской равнины : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 04.00.03 / А. И. Щеглов. – М., 1997. – 45 с.
9. Сибирякова, М. Д. Определение типов леса по растениям индикаторам / М. Д. Сибирякова, Т. Б. Вернандер. – М., Ленинград : Гослесбумиздат, 1957. – 148 с.
10. МВИ.МН 1181-2011. Методика измерений объёмной и удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K на гамма-бета-спектрометре типа МКС-АТ1315, объёмной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs , ^{40}K на гамма-спектрометре типа ЕЛ 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды. – Минск : «Атомтех», 2011. – 31 с.
11. МВИ.МН 3151-2009. Методика выполнения измерений удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am в почве, донных отложениях и других объектах окружающей среды на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами с бериллиевым или композитным углеродным окном. – Хойники : «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник», 2009. – 14 с.
12. Лакин, Г. Ф. Биометрия : учеб. пособие для биологич. спец. вузов / Г. Ф. Лакин – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1980. – 293 с.

¹Полесский государственный радиационно-экологический заповедник

²Институт радиобиологии
НАН Беларуси

Поступила в редакцию 25.02.2021

Динамика обеспеченности почв кальцием

А.Ф. КАРПЕНКО

Анализируются результаты исследований содержания кальция в пахотной и луговой почвах шести районов Гомельской области. Показано колебание средневзвешенных показателей в 2013 г. для пахотной почвы в пределах 763–1352 мг/кг, в 2017 г. – 809–1346 мг/кг почвы, в луговой – соответственно 1238–1688 и 1328–1671 мг/кг почвы. Отмечается увеличение количества площадей с более высоким содержанием в почве кальция. Если в 2013 г. 71,1 % обследованных площадей пашни имели удельную концентрацию кальция более 801 мг/кг почвы, то по состоянию на 2017 г. уже 73,1 %, соответственно луговых почв – 86,4 и 89,6 %.

Ключевые слова: почвы, кальций, содержание, обеспеченность.

The results of research are analyzed on the content of available calcium in arable and meadow soils of six districts in the Gomel Region. The analysis shows that the average weighted values of calcium content in 2013 vary in the range of 763–1352 mg/kg in arable soils and 1238–1688 mg/kg in meadow soils, whereas in 2017 these values are in the ranges of 809–1346 and 1328–1671 mg/kg respectively. There is an increase in the number of areas with a higher content of calcium in the soils. Thus, a specific concentration value of calcium above 801 mg per kilogramme of soil is found in 73,1 % of arable and 89,6 % of meadow lands of a total researched area in 2017 against respective 71,1 and 86,4 % as of 2013.

Keywords: soils, calcium, concentration, sufficiency.

Введение. Почвенное плодородие во многом зависит от достаточного для развития растений количества минеральных элементов в почвенном горизонте. Среди большого состава биологически важных минеральных элементов особая роль отводится такому макроэлементу как кальций. Известно, что кальций является структурным элементом клеточных оболочек, и он необходим для образования новых клеток растений. Поэтому дефицит кальция может сдерживать рост всех частей растения, в том числе корневой системы. Слабое развитие корневой системы может приводить к усилению дефицита и нарушению баланса других минеральных элементов питания растений [1].

Кальций находится в почве и растениях в виде двухвалентного катиона. Обменно-поглощенные почвенными коллоидами ионы этого элемента являются наиболее доступными для растений. Растворы в большинстве почв содержат кальций в избытке: свыше 90 % общей концентрации катионов. Поэтому кальций – наиболее важный катион, определяющий степень растворения микроэлементов в почве [2].

Согласно литературным данным, на минеральный состав почв влияют климат и погодные условия. При обильных дождях и высокой температуре быстро происходит выветривание. Вследствие гумидного климата и потерь минеральных веществ в почвах происходит их выщелачивание, что вызывает подкисление и снижение плодородия почв.

Запасы минеральных веществ в почвах достаточно велики, но они часто находятся в недоступных для растений формах. Поэтому общепринятой обеспеченностью растений минеральными элементами считается критерий наличия в почве легкодоступных минеральных соединений. В дерново-подзолистых почвах Беларуси валовое содержание кальция в пахотном слое составляет 0,4–1,0 %, что существенно меньше его кларка [3], [4].

До начала интенсивного известкования примерно до 90 % площади пахотных почв Беларуси имели недостаток обменных форм кальция, который ограничивал урожайность культурных растений. В настоящее время на основных массивах почв содержание кальция в доступной форме для питания растений не лимитирует формирование высокого уровня урожайности. Средневзвешенное содержание обменного кальция в почвах Беларуси в последние два десятилетия стабилизировалось на уровне CaO около 1000–1100 мг/кг на пашне и около 1500 мг/кг в луговых почвах [1], [5].

Роль оптимизации реакции почв существенно возрастает в интенсивном земледелии. Эффективность минеральных удобрений снижается как в сильнокислом, так и в нейтральном и слабощелочном диапазоне почвенной среды [6], [7], [8]. Оптимизация кислотности почв является важным фактором, способствующим новообразованию и закреплению гумусовых веществ, поскольку сильнокислая или щелочная реакция ограничивают их образование и закрепление в почве [9], [10].

Целью настоящего исследования является анализ результатов известкования, распределения площади пахотных и луговых почв в Гомельской области по содержанию обменных форм кальция в почвах за период между двумя последними турами агрохимического обследования. Исследована также динамика за весь период мониторинга.

Материал и методы исследований. Материалы работы – результаты многолетних исследований почв Гомельской области. Методы исследований – классические методы агрохимии и почвоведения. Кроме того, были также использованы общенаучные методы – анализа и синтеза, индукции и дедукции, аналогии и моделирования, абстрагирования и конкретизации.

Результаты исследования и их обсуждение. В Беларуси известкование кислых почв организовано на государственном уровне и проводится с 1965 г. За это время в республике создана и успешно работает система научного и материально-технического обеспечения данного вида работ. Она предусматривает, что областные проектно-изыскательские станции химизации сельского хозяйства (ОПИСХ) разрабатывают проектно-сметную документацию, а затем совместно со специалистами хозяйств-заказчиков и организаций-исполнителей контролируют площади, дозы извести и качество выполняемых работ. В рамках Гомельской области проведение данных работ возложено на Гомельскую ОПИСХ. Витебское ОАО «Доломит» обеспечивает республику доломитовой мукой. Районные объединения агросервиса осуществляют хранение, транспортировку и внесение извести в почву. Научное обеспечение проблемы известкования на протяжении всего периода осуществляет РНДУП «Институт почвоведения и агрохимии».

Анализ динамики содержания подвижного кальция в почве пашни сельскохозяйственных районов Гомельской области свидетельствует, что его средневзвешенный показатель в период VII тура обследования (1989–1993 г.) имел значение 885 мг/кг, VIII тура (1994–1997 г.) – 896 мг/кг, IX тура (1998–2001 г.) – 832 мг/кг, X тура (2002–2005 г.) – 854 мг/кг и XI тура (2006–2009 г.) – 864 мг/кг. Из приведенных данных видно, что если в период 1989–1997 гг. показатели содержания подвижного кальция в почве пашни приросли на 11 мг/кг, то уже с 1998 они снизились и составляли 92,8–96,4 % от достигнутого уровня. В отношении почвы улучшенных сенокосов и пастбищ установлено: содержание подвижного кальция в период VII тура обследования находилось на уровне 1297 мг/кг почвы, VIII тура – 1295 мг/кг, IX тура – 1253 мг/кг, X тура – 1352 мг/кг и XI тура – 1370 мг/кг. Как видно из приведенного ряда показателей можно говорить о положительной динамике увеличения подвижного кальция в почве улучшенных сенокосов и пастбищ Гомельской области. За период с 1989 по 2009 гг. прирост подвижного кальция составил 73 мг/кг почвы или на 5,6 %.

Гомельской ОПИСХ в 2013 г. были выполнены исследования сельскохозяйственных земель шести районов Гомельской области и в 2017 г., через четыре года, в этих же районах проведено повторное почвенное обследование. В течение этих лет специалистами отдела почвоведения проведено полевое агрохимическое обследование в Октябрьском, Мозырском, Лоевском, Буда-Кошелевском, Кормянском и Чечерском районах. Так, в 2013 г. в этих районах было обследовано 174,3 тыс. га, в 2017 г. – 187,2 тыс. га пахотных земель сельскохозяйственных угодий (таблица 1).

Таблица 1 – Агрохимическая характеристика пахотных почв сельскохозяйственных районов Гомельской области обследованных в 2013 и 2017 гг. по содержанию кальция

Наименование района	Год обследования	Площадь, га	Градации кальция, мг/кг почвы											
			менее 400 ^x		401–800		801–1200		1201–1600		1600–2000		более 2000	
			менее 1200 ^{xx}		1201–2400		2401–3600		3601–4800		4801–6000		более 6000	
га	%	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%			
Октябрьский	2013	23791	239	1,0	4569	19,2	6901	29,0	1717	7,2	739	3,1	9626	40,5
	2017	27203	65	0,2	6083	22,4	7242	26,6	1901	7,0	1339	4,9	10573	38,9
	+ -	3412	-174	-0,8	1514	3,2	341	-2,4	184	-0,2	600	1,8	947	-1,6

Окончание таблицы 1

Мозырский	2013	21808	351	1,6	14616	67,0	5773	26,5	542	2,5	136	0,6	390	1,8
	2017	22864	86	0,4	13083	57,2	8541	37,4	713	3,1	224	1,0	217	0,9
	+ -	1056	-265	-1,2	-1533	-9,8	2768	10,9	171	0,6	88	0,4	-173	-0,9
Лоевский	2013	23292	85	0,4	8849	37,9	7241	31,1	2337	10,0	1530	6,6	3250	14,0
	2017	23023	168	0,7	7136	31,0	7539	32,8	3079	13,4	1367	5,9	3734	16,2
	+ -	-269	83	0,3	-1713	-6,9	298	1,7	742	3,4	-163	-0,7	484	2,2
Буда-Кошелёвский	2013	51919	260	0,5	12652	24,4	26349	50,7	7782	15,0	2221	4,3	2655	5,1
	2017	59756	494	0,8	12020	20,1	28696	48,0	9836	16,5	3481	5,8	5229	8,8
	+ -	7837	234	0,3	-632	-4,3	2347	-2,7	2054	1,5	1260	1,5	2574	3,7
Кормянский	2013	30834	183	0,6	4695	15,2	17290	56,1	6748	21,9	1176	3,8	742	2,4
	2017	31667	111	0,4	6095	19,2	19368	61,2	4919	15,5	680	2,1	494	1,6
	+ -	833	-72	-0,2	1400	4,0	2078	5,1	-1829	-6,4	-496	-1,7	-248	-0,8
Чечерский	2013	22639	170	0,8	3759	16,6	12310	54,4	4937	21,8	529	2,3	934	4,1
	2017	22686	113	0,5	4864	21,4	11974	52,8	4555	20,1	466	2,1	714	3,1
	+ -	47	-57	-0,3	1105	4,8	-336	-1,6	-382	-1,7	-63	-0,2	-220	-1
Итого	2013	174283	1288	0,7	49140	28,2	75864	43,5	24063	13,8	6331	3,6	17597	10,1
	2017	187199	1037	0,6	49281	26,3	83360	44,5	25003	13,4	7557	4,0	20961	11,2
	+ -	12916	-251	-	141	-1,9	7496	1,0	940	-0,4	1226	0,4	3364	1,1

Примечание: х – градация для минеральных почв, хх – градация для торфяных почв.

Как следует из показателей таблицы 1, по содержанию кальция в дерново-подзолистой и торфяной почвах применяется шестиинтервальная градация показателей. Анализ результатов исследований свидетельствует, что если площади первого интервала (менее 400 мг/кг почвы) и второго интервала (401–800 мг/кг почвы) в 2013 г. составили 28,9 % от всей площади обследованных площадей, то в 2017 г. их удельный вес снизился на 2,0 %. Одновременно отмечен прирост площадей на 1,0 % в третьем, на 0,4 % в пятом и на 1,1 % в шестом интервалах. Из этого следует, что произошло увеличение количества площадей с более высоким содержанием кальция в почве. Если в 2013 г. 71,1 % обследованных площадей имели удельную концентрацию кальция более 801 мг/кг почвы, то по состоянию на 2017 г. уже 73,1 %.

При повторном определении средневзвешенное содержание кальция в пахотной почве в целом по шести районам было выше на 8,5 мг/кг в сравнении с предыдущим обследованием данных почв (рисунок 1). Исключение составляли лишь показатели в Кормянском и Чечерском районах, где они были соответственно ниже на 70,0 и 39,0 мг/кг почвы. Колебания средневзвешенного показателя по отдельным районам в 2013 г. находилось в пределах 763–1352 мг/кг, в 2017 г. – 809–1346 мг/кг почвы. Среди обследованных районов самое низкое содержание кальция в почве пашни установлено в Мозырской районе, где оно в 2017 г. было на 208–537 мг/кг почвы меньше его средневзвешенного содержания в остальных районах.

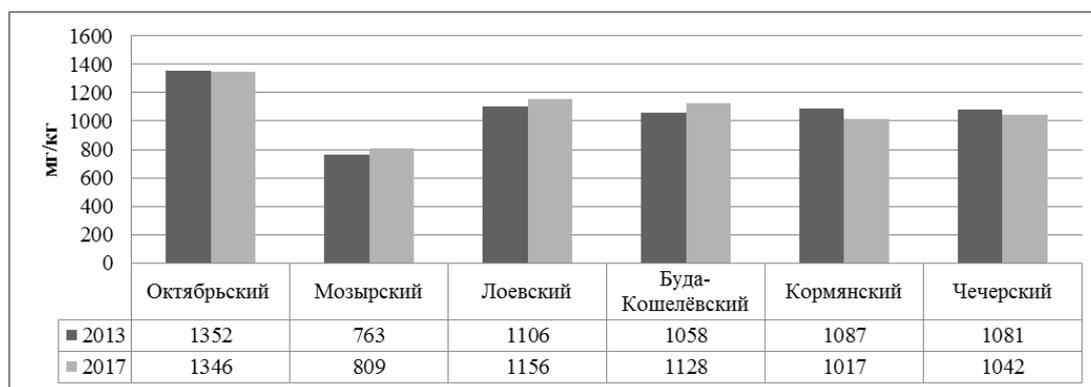


Рисунок 1 – Средневзвешенное содержание кальция в пахотной почве обследованных районов в 2013 и 2017 гг.

В 2017 г. количество обследованных площадей почв улучшенных сенокосов и пастбищ было меньше на 9,8 тыс. га в сравнении с предыдущим их изучением в 2013 г. (таблица 2). Распределение площадей по удельной концентрации в почве кальция показало, что если в 2013 г. в первые три группы их входило 37,8 %, в четвертую-шестую 62,2 %, то в 2017 г. соответственно 32,2 и 67,8 %.

Сравнение пахотных и луговых площадей по содержанию кальция свидетельствует, что в первой и второй группах (до 800 мг/кг почвы) в 2017 г. находилось 10,4 % луговых почв и 26,9 % пахотных почв. Из чего следует, что содержание кальция в луговой почве выше, чем в пахотной. Такая же ситуация наблюдалась и при обследовании почв в 2013 г.

Таблица 2 – Агрохимическая характеристика почв улучшенных сенокосов и пастбищ сельскохозяйственных районов Гомельской области обследованных в 2013 и 2017 гг. по содержанию кальция

Наименование района	Год обследования	Площадь, га	Градации кальция, мг/кг почвы											
			менее 400 ^x		401–800		801–1200		1201–1600		1600–2000		более 2000	
			менее 1200 ^{xx}	1201–2400	2401–3600	3601–4800	4801–6000	более 6000	га	%	га	%	га	%
Октябрьский	2013	12896	7	0,1	949	7,4	1600	12,4	1341	10,4	844	6,5	8155	63,2
	2017	10574	17	0,2	696	6,6	1230	11,6	1081	10,2	915	8,7	6635	62,7
	+-	-2322	10	0,1	-253	-0,8	-370	-0,8	-260	-0,2	71	2,2	-1520	-0,5
Мозырский	2013	7770	75	1,0	1863	24,0	2222	28,5	1212	15,6	846	10,9	1552	20,0
	2017	7990	7	0,1	1612	20,2	2340	29,2	1195	15,0	1162	14,5	1674	21,0
	+-	220	-68	-0,9	-251	-3,8	118	0,7	-17	-0,6	316	3,6	122	1
Лоевский	2013	8263	24	0,3	1509	18,3	2348	28,4	1062	12,9	826	10,0	2494	30,1
	2017	9085	22	0,2	1003	11,0	2218	24,4	1475	16,2	970	10,7	3397	37,5
	+-	822	-2	-0,1	-506	-7,3	-130	-4	413	3,3	144	0,7	903	7,4
Буда-Кошелёвский	2013	24205	103	0,4	2867	11,8	6027	24,9	4062	16,8	3048	12,6	8098	33,5
	2017	17233	65	0,4	1307	7,6	3333	19,3	2962	17,2	1715	10,0	7851	45,5
	+-	-6972	-38	0	-1560	-4,2	-2694	-5,6	-1100	0,4	-1333	-2,6	-247	12
Кормянский	2013	6627	34	0,5	315	4,8	2019	30,5	1557	23,5	772	11,6	1930	29,1
	2017	5030	0	0,0	86	1,7	1306	26,0	1136	22,6	750	14,9	1752	34,8
	+-	-1597	-34	-0,5	-229	-3,1	-713	-4,5	-421	-0,9	-22	3,3	-178	5,7
Чечерский	2013	7113	150	2,1	977	13,7	2180	30,7	1552	21,8	654	9,2	1600	22,5
	2017	7121	129	1,8	1016	14,3	2014	28,2	1615	22,7	363	5,1	1984	27,9
	+-	8	-21	-0,3	39	0,6	-166	-2,5	63	0,9	-291	-4,1	384	5,4
Итого	2013	66874	393	0,6	8480	12,7	16396	24,5	10786	16,1	6990	10,5	23829	35,6
	2017	57033	240	0,4	5720	10,0	12441	21,8	9464	16,6	5875	10,3	23293	40,9
	+-	-9841	-153	-0,2	-	-2,7	-3955	-2,7	-1322	0,5	-1115	-0,2	-536	5,3

Примечание: x – градация для минеральных почв, xx – градация для торфяных почв.

Изменение средневзвешенных показателей содержания кальция через четырехлетний период на почвах улучшенных луговых угодий приведено на рисунке 2. В пяти районах установлено увеличение средневзвешенных показателей содержания кальция.

Только в Октябрьском районе данный показатель в 2017 г. был на 17 мг/кг ниже. В Мозырском районе он оказался выше на 90 мг/кг почвы, в Лоевском – на 126 мг/кг почвы, в Буда-Кошелёвском – на 130 мг/кг почвы, в Кормянском – на 100 мг/кг почвы и в Чечерском районе – на 27 мг/кг почвы. Колебания средневзвешенного показателя по отдельным районам в 2013 г. находилось в пределах 1238–1688 мг/кг, в 2017 г. – 1328–1671 мг/кг почвы. Средневзвешенное содержание в луговой почве кальция в 2013 г. установлено в количестве 1443 мг/кг почвы, в 2017 г. – 1519 мг/кг почвы или было больше на 76 мг/кг.

Сравнение изменения средневзвешенных показателей содержания кальция в пахотной и луговой почвах свидетельствует, что если за четырёхлетний период на пахотной почве прирост показателя составил 8,5 мг/кг почвы, то на луговых угодьях – 76 мг/кг.

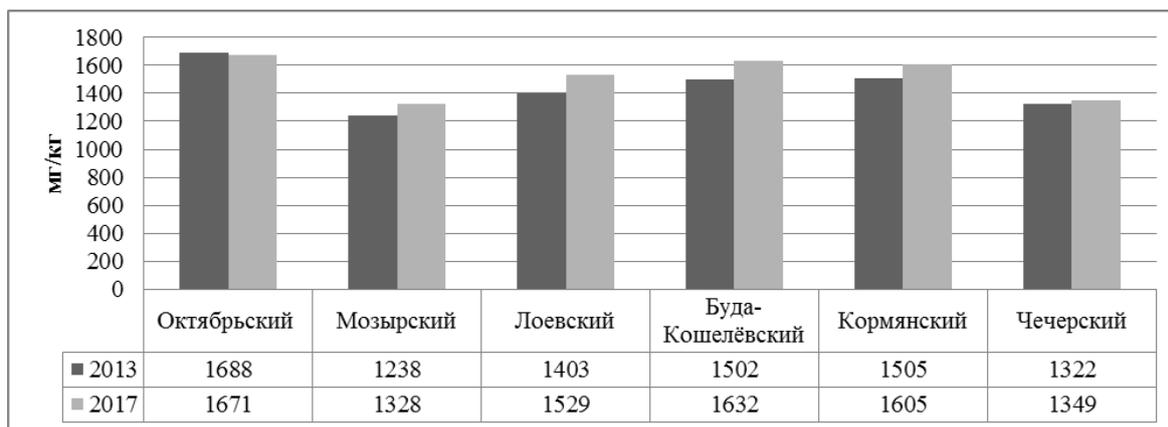


Рисунок 2 – Средневзвешенное содержание кальция в луговой почве обследованных районов в 2013 и 2017 гг.

Выводы. Кальций является незаменимым минеральным элементом в жизни растений и животных. Анализ результатов исследований на содержание кальция в почве сельскохозяйственных районов Гомельской области свидетельствует о колебании средневзвешенных показателей, в 2013 г. на пахотной почве в пределах 763–1352 мг/кг, в 2017 г. – 809–1346 мг/кг почвы, в луговой – соответственно 1238–1688 и 1328–1671 мг/кг. Наблюдается увеличение количества площадей с более высоким содержанием в почве кальция. Если в 2013 г. 71,1 % обследованных площадей пашни имели удельную концентрацию кальция более 801 мг/кг почвы, то по состоянию на 2017 г. уже 73,1 %, соответственно луговых почв – 86,4 и 89,6 %.

Литература

1. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич [и др.] ; под общ. ред. И. М. Богдевича. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2012. – 276 с.
2. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас ; пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – С. 118–135.
3. Оптимальные параметры плодородия почв / Т. Н. Кулаковская [и др.]. – М. : Колос, 1984. – 272 с.
4. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Василюк. – Минск : Изд-во БГУ, 2003. – 322 с.
5. Богдевич, И. М. Оценка воздействия факторов плодородия почв и норм удобрений / И. М. Богдевич, Р. В. Шаталова, Е. А. Шыбеко // Параметры и модели плодородия почв и продуктивности агроценозов. – Пушино, 1985. – С. 70–77.
6. Инструкция о порядке известкования кислых почв сельскохозяйственных земель : утв. Министерством сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, 13.10.2008 г., № 77. – Минск, 2008. – 30 с.
7. Программа мероприятий по сохранению и повышению плодородия почв в Республике Беларусь на 2011–2015 гг. / В. Г. Гусаков [и др.] ; НАН Беларуси, МСХП РБ, Госкомимущества, Ин-т почвоведения и агрохимии ; под ред. В. Г. Гусакова. – Минск, 2010. – 106 с.
8. Путятин, Ю. В. Минимизация поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию / Ю. В. Путятин. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2008. – 255 с.
9. Карягина, Я. А. Влияние известкования на биологическую активность и баланс гумуса в дерново-подзолистой суглинистой почве / Л. А. Карягина, Л. И. Костюкевич // Почвоведение. – 1991. – № 10. – С. 84–91.
10. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. – Минск : Ин-т радиологии, 2012. – 121 с.

УДК: 551.4 (476.13)

Эффект антибиотиков разных химических групп на генотоксичность в *Allium* тесте

И.И. КОНЦЕВАЯ

На основе анализа различных типов хромосомных аберраций выявлено, что тестируемые антибиотики проявляют большую способность вызывать анеугенные эффекты, чем кластогенные. Бета-лактамы и стрептомицин в концентрации 1000,0 мг/л способны проникать в активно пролиферирующие клетки высших растений и изменять скорость вступления их в митоз и нормальное протекание процессов деления. Среди патологий митоза доминирует к-митоз.

Ключевые слова: *Allium* тест, митоз, патология митоза, антибиотики, микроскопические параметры.

The analysis of various types of chromosomal aberrations revealed a greater ability of tested antibiotics to cause aneugenic effects rather than clastogenic ones. Beta-lactam antibiotics and streptomycin at the concentration of 1000,0 mg/l are able to penetrate into actively proliferating higher plants cells and then change the rate of the mitosis entry as well as the normal cell division processes. K-mitosis dominates among the mitosis pathologies.

Keywords: *Allium* test, mitosis, mitosis pathology, antibiotics, microscopic parameters.

Введение. На сегодняшний день очевидно положительное динамическое развитие биотехнологических исследований с использованием культуры *in vitro* растений. При этом специалисты сталкиваются с рядом трудностей, которые необходимо учитывать и решать. В первую очередь это касается получения и поддержания стерильных культур клеток и тканей растений. Проблема получения гнотобиотических культур (в частности, в коллекциях *in vitro* генетических банков растений) связана со сложностью выявления и элиминации бактериальной микрофлоры, а также с негативным эффектом режимов стерилизации. Поэтому для решения задачи по избавлению от контаминации растительных тканей *in vitro* исследователи вынуждены применять антибактериальную терапию [1], [2].

Актуальным вопросом сегодня является изучение влияния побочных свойств антибиотиков, оказываемых воздействий на эукариотический организм. Единично синтезированные вещества могут вызывать изменения генетического аппарата (точечные, хромосомные и геномные мутации), приводя к неминуемым как положительным, так и отрицательным последствиям [3], [4].

В настоящее время существует ряд современных молекулярно-биологических тестов, но в силу высокой технологической сложности и стоимости их применение оказывается ограниченным. При решении общей задачи анализа воздействия тех или иных химических веществ можно получить сходную информацию и более простым способом. Для этого система должна быть относительно простой и доступной, пригодной для широкого использования. Биотесты растений являются чувствительными и простыми по сравнению с биотестами животных, что было подтверждено в международных совместных исследованиях в рамках программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП), Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), международной программы о химической безопасности (МПК), Агентства по охране окружающей среды США (АООС США) [5]–[7]. Они доказали свою эффективность в качестве тестов для генотоксического мониторинга загрязнителей окружающей среды в отношении млекопитающих и особенно человека [5], [7]–[9]. Из растительных моделей лук обыкновенный существенно доминирует. Появилось такое понятие как «*Allium* тест».

Allium тест – очень удобный инструмент для оценки продуктов и факторов на генотоксичность [7], [8], [10]. Он простой в исполнении, чувствительный, дешевый, эффективный; лук обыкновенный является толерантным к разным условиям проращивания (рН от 3,5 до 11) и доступен круглогодично [11]. Лук обыкновенный имеет хорошо изученный геном ($2n =$

16 хромосом), хромосомы относительно большие и длинные, поэтому он подходит для метафазного и ана-телофазного анализов [7]. Несмотря на большие различия в организации и метаболизме между растительными и животными клетками, многими авторами сделан вывод о возможности экстраполировать полученные результаты *A. cepa* на животные организмы, включая человека [5], [10], [12], [13], [14].

Цель работы: протестировать на генотоксичность широкий ряд антибиотиков разных химических групп, активно используемых в культуре *in vitro* растений, на основе микроскопических параметров в *Allium* тесте.

Материал и методы исследований. Объектом исследования явились меристематические клетки придаточных корней лука обыкновенного (*A. cepa*). Исследование ответных реакций растений лука обыкновенного в условиях действия водных растворов антибиотиков выполняли с помощью модифицированного *Allium* теста [15]. Луковицы, необходимые для постановки опыта, были приобретены в специализированном магазине; сорт лука – «Стурон» (голландской селекции). Тестировали антибиотики разных химических групп [16]: бета-лактамы (цефотаксим, аугментин, ампициллин), аминогликозидные (гентамицин, стрептомицин, канамицин, амикацин), тетрациклины (тетрациклин, доксициклин), группу «антибиотики разных групп» (рифампицин, капреомицин). При выборе концентраций антибиотиков для некоторых из них исходили из концентраций, предлагаемых в информации PhytoTechnology Laboratories (USA) (Antibiotics, 2011). Часть концентраций антибиотиков была выбрана на основании наших предварительных исследований. В качестве контроля использовали водопроводную воду. Растворы антибиотиков также готовили на водопроводной воде, что допущено автором стандартной методики [13].

Давленные препараты для цитогенетического анализа, окрашенные ацетогематоксилином, изготавливали по общепринятой методике [17], [18]. Для определения мутагенного эффекта антибиотиков применяли метафазный метод и ана-телофазный метод учета перестроек хромосом в клетках корневых меристем лука [17], [18]. Эти параметры оценивались под световым микроскопом (Olympus BX-40-увеличение-400x), было проанализировано на один вариант более 10 000 клеток. Патологию митоза (ПМ) подсчитывали как отношение числа клеток с нарушениями митоза к общему числу делящихся клеток [18] и классифицировали отдельно для каждого корешка по И.А. Алову с незначительной модификацией [19].

Дополнительно на основе анализа различных типов хромосомных aberrаций они были сгруппированы как кластогенные (хромосомные мосты, фрагменты и разрывы) или анеугенные (хромосомные потери, хромосомная задержка, асинхронное веретено деления, к-митоз) по данным [20].

Статистическую обработку полученных результатов исследований проводили с помощью пакета прикладного программного обеспечения Microsoft Excel и «Statsoft (USA) Statistica v.7.0» с расчетом выборочной средней и стандартной ошибки среднего. Достоверность различий данных определяли с помощью t-критерия Стьюдента.

Результаты исследований и их обсуждение. Установлено, что тестируемые бета-лактамы антибиотики, а именно: цефотаксим, аугментин и ампициллин, – вызывают существенное возрастание патологических митозов в клетках образовательной ткани лука обыкновенного. Об этом свидетельствует возрастание по сравнению с контролем, во-первых, значений ПМ в 2–4 раза (с 12,0 до 40,5 %), во-вторых, удлинение доли метафазы на стадии митоза (с 35,3 до 48,6 %), в-третьих, увеличение значений МПИ в 4–7 раз (с 1,3 до 7,8).

Спектр ПМ включал наиболее общие типы митотических нарушений. В контрольном варианте из всех регистрируемых патологий митоза наблюдали в 73 % случаев патологию «забегание/отставание хромосом» и в 23 % – патологию «асинхронное веретено деления». Однако необходимо подчеркнуть, что первая форма патологии может возникать не только в патологических, но и физиологических условиях. Вторая форма патологии не влияет на распределение ядерного материала ДНК, однако может привести к неравномерному распределению цитоплазматических органелл и, соответственно, ДНК митохондрий и пластид. Патологию «мосты» наблюдали в 8,0 % из всех случаев патологий митоза при воздействии аугментина в концентрации 800,0 мг/л, в остальных вариантах опыта регистрировали только в единичных клетках.

Результаты тестирования антибиотиков бактериостатического действия показали, что доксициклин (100,0 мг/л), рифампицин (30,0 мг/л) и капреомицин (1000,0 мг/л) в тестируемых концентрациях не оказывают существенного влияния на возникновение патологических процессов в клетках. В то же время при применении тетрациклина (20,0 мг/л) возрастает в 2,0 раза количество патологических митозов в клетках по сравнению с контролем (с 12,0 до 24,3 %). Тетрациклин индуцировал задержку митоза в метафазе, об этом свидетельствует и увеличение доли метафаз в митозе и возрастание в 3 раза значений МПИ по сравнению с контролем (с 1,3 до 3,9).

Анализ спектра патологических митозов по вариантам опыта показал, что и в контроле, и в опытных вариантах доминирует патология «забегание/отставание хромосом» в анафазе митоза. Патологию «мосты» регистрировали во всех клетках (около 61,0 % случаев), находящихся на стадиях анафазы и телофазы, только в варианте применения тетрациклина (концентрация 20,0 мг/л). Выявлена разная реакция меристематических клеток корешков лука при действии структурных изомеров, каковыми являются тетрациклин и доксициклин. Следует акцентировать внимание на токсичном действии тетрациклина по сравнению с доксициклином.

Все наблюдаемые аномалии при делении клеток в вариантах опыта были ранжированы по следующей классификации [21]: патологии, связанные с повреждением хромосом (кластогенный эффект), а также с нарушением их структуры; патологии, связанные с повреждением митотического аппарата; патологии, являющиеся следствием нарушения прохождения цитокинеза.

К первой группе аномалий, наблюдаемых в митотических клетках, относятся патологии, связанные с нарушением или повреждением структуры хромосом. Аномалии 2-й и 3-й групп – анеугенные эффекты (цитогенетические повреждения на надхромосомном уровне, которые могут привести к хромосомным потерям) [22].

Были оценены кластогенные и анеугенные эффекты тестируемых антибиотиков, результаты представлены на рисунке 1.

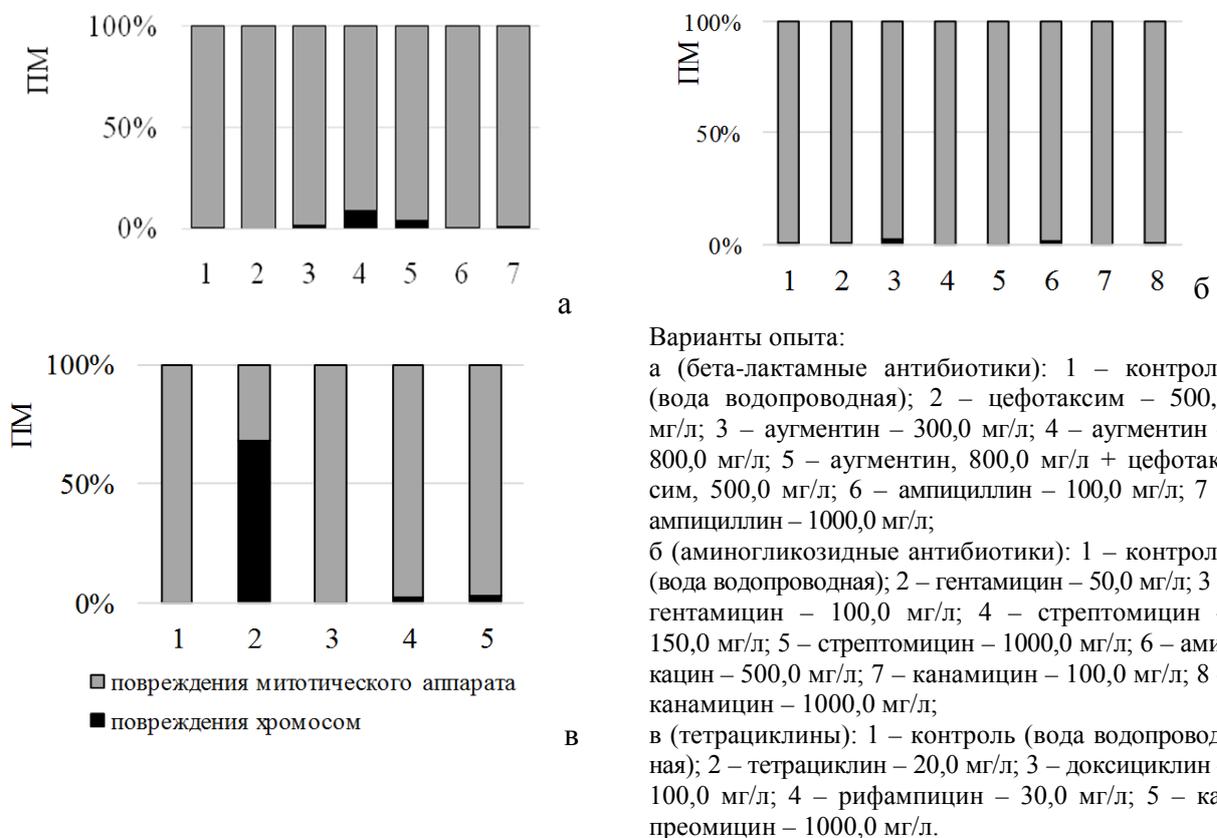


Рисунок 1 – Доля основных разновидностей патологических митозов в % от всех учтенных делящихся клеток лука (ось абсцисс – варианты опыта). Количество митотических аномалий (ПМ) в каждом варианте принято за 100 % (ось ординат)

Отмечено, что аугментин (в концентрации 800,0 мг/л) и тетрациклин (концентрация 20,0 мг/л) вызывают патологии, связанные с повреждением хромосом (кластогенный тип aberrаций), соответственно, 9,0 и 62,0 %. Остальные тестируемые антибиотики, их комбинации и применяемые концентрации индуцируют патологии, связанные с повреждениями митотического аппарата (анеугенный тип).

Анеугены или анеуплоидогены – это большой класс преимущественно химических мутагенов, которые могут и не вызывать генных мутаций и структурных хромосомных aberrаций, а действуют в иной манере, затрагивая различные компоненты аппарата сегрегации хромосом. Для нормальной сегрегации хромосом в процессе митоза необходимо совместное участие множества клеточных структур в тонко скоординированных событиях, таких как конденсация хромосом, образование биполярного веретена, движение хромосом к полюсам веретена и цитокинез [23].

Основной клеточной структурой, отвечающей за сегрегацию хромосом, является аппарат веретена деления. Его главными структурно-функциональными компонентами являются микротрубочки, центросомы и кинетохоры. Нормальное функционирование веретена деления обеспечивают его мембранное окружение, ферменты киназы, осуществляющие фосфорилирование белков, участвующих в расхождении хромосом, а также ионы кальция. Нарушение функций любого из перечисленных компонентов может приводить к неправильному прикреплению микротрубочек к кинетохору, деполимеризации тубулина, дефектов центромерной ДНК, белков кинетохора или нарушений процесса его сборки, поздней репликации, периферической локализации хромосом в ядре и эпигенетических модификаций гистонов [23]. И в итоге, возможно, – к нерасхождению или «отставанию» хромосом/хроматид в анафазе [24] либо, как в вариантах с бета-лактамами антибиотиками – формирование к-митоза. К-митоз указывает на то, что химическое вещество ингибирует образование веретена в соответствии с механизмом, сходным с действием колхицина, и индукция к-митоза обычно ассоциируется с ядами веретена, что указывает на анеугенный эффект [25]. Исход к-митоза зависит от дозы и времени воздействия статмокинетического яда на делящуюся клетку. При токсических дозах наблюдается пикноз ядра и гибель клетки. Воздействие небольших доз обратимо. В течение нескольких часов может восстановиться митотический аппарат и продолжиться митотическое деление [19].

При рассмотрении анеугенного эффекта действия тестируемых химических групп антибиотиков возможными механизмами могут являться: 1) нарушения деления клетки и сегрегации хромосом, связанные с повреждением клеточных структур таких, как веретено деления, кинетохоры и клеточные мембраны, что может быть обусловлено ингибированием полимеризации тубулина или белков цитоскелета [7]; 2) ингибирование синтеза ДНК; 3) изменение клеточного метаболизма в результате подавления функции ферментов топоизомераз или дисбаланса нуклеотидного пула; 4) истощение резервов гомеостатической защиты клетки, например, антиоксидантных защитных механизмов и др. [24].

Среди наблюдаемых кластогенных aberrаций анафазные мосты составляют основную долю. Выявлены мосты, имеющие по морфологии как хромосомную, так и хроматидную природу. Механизм формирования анафазных мостов различен. Но наблюдаемая в опыте визуальная картина свидетельствует о том, что хромосомные мосты могут возникать в результате слипания, уровень которого может варьировать [20]. Липкость хромосом может быть вызвана физической адгезией хромосомных белков [26] или нарушениями в метаболизме нуклеиновых кислот клетки, или растворением белкового покрытия ДНК в хромосомах [27].

Выводы. 1 Сравнительный анализ долей aberrаций кластогенного типа и aberrаций анеугенного типа по всем вариантам исследования позволил прийти к заключению, что тестируемые антибиотики проявляют большую способность вызывать нарушения митоза, связанные с повреждением митотического аппарата, чем нарушения, связанные с повреждением и нарушением структуры хромосом.

2. Полученные данные свидетельствуют, что бета-лактамы антибиотиков способны проникать в активно пролиферирующие клетки высших растений и изменять скорость вступления их в митоз и нормальное протекание процессов деления. При этом среди патологий митоза доминирует к-митоз.

3. Применение стрептомицина в концентрации 1000 мг/л индуцирует появление патологических митозов в меристематических клетках с большой долей к-митоза.
4. Необходимо учитывать потенциальную опасность тетрациклина в концентрации 20 мг/л на клеточном уровне. При этом доминирующей патологией митоза являются анафазные мосты, возникшие в результате слияния хромосом.
5. Антибиотики тетрациклин, стрептомицин, бета-лактамы (цефотаксим, аугментин, ампициллин) не могут быть рекомендованы на более длительный срок при применении в антибактериальной терапии биотехнологии растений, поскольку они могут повредить генетическую основу растений.

Литература

1. Дунаева, С. Е. Бактериальные микроорганизмы, ассоциированные с тканями растений в культуре *in vitro*: идентификация и возможная роль / С. Е. Дунаева, Ю. С. Оследкин // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – Т. 5, № 1. – С. 3–15.
2. Концевая, И. И. Использование антибиотиков в культуре тканей берёзы / И. И. Концевая // Лесоведение. – 2011. – № 1. – С. 45–51.
3. Kumar, S. Chromosomal Disturbances during Mitotic Activity of Root Tip Cells in *Allium* by Certain Commonly Used Antibiotics / S. Kumar // Pharmacogn. J. – 2018. – Vol. 10(2). – P. 355–365.
4. Chondrou, V. Demopoulos Combined study on clastogenic, aneugenic and apoptotic properties of doxorubicin in human cells *in vitro* / V. Chondrou [et al.] // J. of Biol Res-Thessaloniki. – 2018. – Vol. 25. – P. 17.
5. Guide to short-term tests for detecting mutagenic and carcinogenic chemicals / prepared for the IPCS by the International Commission for Protection Against Environmental Mutagens and Carcinogens Environmental Health Criteria 51 WORLD HEALTH ORGANIZATION GENEVA. – 1985. – № 51. – 212 p.
6. Ma, T. H. The international program on plant bioassays and the report of the follow-up study after the hands-on workshop in China / T. H. Ma // Mutat. Res. – 1999. – Vol. 426. – P. 103–106.
7. Bonciu, E. P. An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay / E. P. Bonciu [et al.] // Caryologia: international journal of cytology, cytosystematics and cytogenetics. – 2018. – Vol. 71, № 3. – P. 191–209.
8. Grant, W. F. Chromosome aberration assays in *Allium*. A report of the U.S. Environmental Protection Agency Genetox Program / W. F. Grant // Mutat. Res. – 1982. – Vol. 99. – P. 273–291.
9. Kumar, D. Cytogenetic studies of chromium (III) oxide nanoparticles on *Allium cepa* root tip cells / D. Kumar [et al.] // Journal of Environmental Sciences. – 2015. – Vol. 38. – P. 150–157.
10. Fiskesjö, G. The *Allium* test: *In vitro* toxicity testing protocols / G. Fiskesjö // Methods in molecular biology. – 1995. – Vol. 43. – P. 119–127.
11. Tedesco, S. B. Bioindicator of genotoxicity: the *Allium cepa* test / S. B. Tedesco // Environmental contamination. – Croatia: InTech, 2012. – P. 137–156.
12. Fiskesjö, G. The *Allium* test for screening chemicals; evaluation of cytological parameters / G. Fiskesjö // Plants for environmental studies. CRC Press LLC. – New York, 1997. – P. 308–333.
13. Grant, W. F. Plants as sensitive *in situ* detectors of atmospheric mutagens. In: Mutagenicity: new horizons in genetic toxicology / W. F. Grant, K. D. Zura. – Heddle J.A. (ed.). – New York : Academic Press, 1982. – P. 407–433.
14. Musanovic, J. Chromosome aberration and irregular cell cycle in *Allium cepa* root cells caused by different concentrations of Alprazolam / J. Musanovic [et al.] // International Journal of Collaborative Research on Internal Medicine & Public Health. – 2013. – Vol. 5, № 6 – P. 407–418.
15. Fiskejő, G. The *Allium* test as a standard in environmental monitoring / G. Fiskejő // Hereditas. – 1985. – Vol. 102. – P. 99–112.
16. Яковлев, С. В. Краткий справочник по антимикробной химиотерапии: центр биотехнологии, медицины и фармации / С. В. Яковлев, В. П. Яковлев. – М. : Медицина, 2002. – 127 с.
17. Паушева, З. П. Практикум по цитологии растений: учебники и учеб. пособия для студентов высших учеб. заведений / З. П. Паушева – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1988. – 271 с.
18. Калаев, В. Н. Цитогенетический мониторинг: методы оценки загрязнения окружающей среды и состояния генетического аппарата организма / В. Н. Калаев, С. С. Карпова. – Воронеж : ВГУ, 2004. – 80 с.
19. Алов, И. А. Цитофизиология и патология митоза / И. А. Алов. – М. : Медицина, 1972. – 264 с.

20. Leme, D. M. Chromosome aberration and micronucleus frequencies in *Allium cepa* cells exposed to petroleum polluted water – A case study. *Mutation Research / D. M. Leme, M. A. Marin-Morales // Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis.* – 2008. – Vol. 650. – P. 80–86.
21. Довгалюк, А. И. Оценка фито- и цитотоксической активности соединений тяжелых металлов и алюминия с помощью корневой апикальной меристемы лука / А. И. Довгалюк, Т. Б. Калиняк, Я. Б. Блюм // *Цитология и генетика.* – 2001. – Т. 35, № 1. – С. 3–9.
22. Leme, D. M. *Allium cepa* test in environmental monitoring: A review on its application. *Mutation Research / D. M. Leme, M. A. Marin-Morales // Reviews in Mutation Research.* – 2009. – Vol. 682. – P. 71–81.
23. Васильев, С. А. Анеугенный эффект ионизирующего излучения в соматических клетках млекопитающих и человека / С. А. Васильев, В. А. Тимошевский, И. Н. Лебедев // *Генетика.* – 2009. – Т. 45, № 12. – С. 1589–1599.
24. Henderson, L. Thresholds in genotoxicity responses / L. Henderson, S. Albertini, M. Aardema // *Mutat. Res.* – 2000. – Vol. 464. – P. 123–128.
25. Turkoglu, S. Evaluation of genotoxic effects of five flavour enhancers (glutamates) on the root meristem cells of *Allium cepa* / S. Turkoglu // *Toxicology and Industrial Health.* – 2015. – Vol. 31(9) – P. 792–801.
26. Patil, B. C. A comparative study on MN and EMS in the induction of chromosome aberration on root meristem of *Clitoria ternata* L. / B. C. Patil, G. I. Bhat // *Cytologia.* – 1992. – Vol. 57. – P. 259–264.
27. Mercykutty, V. C. Adriamycin induced genetic toxicity as demonstrated by *Allium* test / V. C. Mercykutty, J. Stephen // *Cytologia.* – 1980. – Vol. 45. – P. 769–777.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 25.03.2021

УДК 630*182.2

Анализ видовой структуры дубовых древостоев и прогноз их развития

М.С. ЛАЗАРЕВА, Л.К. КЛИМОВИЧ, А.В. КЛИМОВ, Н.В. МАЛЬЦЕВА

Приведен анализ видовой структуры древесного яруса на различных этапах лесовыращивания дубовых насаждений наиболее распространенных типов леса северной части Беларуси и дан прогноз их развития. На площади около 70 га существует вероятность нежелательной смены пород с формированием смешанных мягколиственных насаждений – 20 %, осинников – 13 %, ельников – 8 % и березняков – 7 %.

Ключевые слова: дубовое насаждение, типы леса, состав насаждений, возраст насаждений, сукцессия, прогноз развития.

The analysis of the species structure of the tree layer at various stages of forest growth of oak stands of the most common forest types in the northern part of Belarus is given and forecast of their development is considered. On the area of about 70 hectares, there is a probability of an undesirable change of species with the formation of mixed soft-leaved stands – 20 %, aspen – 13 %, spruce – 8 % and birch – 7 %.

Keywords: oak forests, forest types, composition of plantings, age of plantings, succession, development forecast.

Введение. Дубовые насаждения являются одними из наиболее ценных в Беларуси. На территории республики дубовые насаждения встречаются повсеместно, в большей степени приурочены к южной ее части. Дубравы отличаются разнообразием условий произрастания, видового состава, структуры и продуктивности [1]. Видовая структура дубрав Беларуси имеет зональные особенности. В подзонах дубово-темнохвойных и грабово-дубово-темнохвойных подтаежных лесов постоянным спутником дуба является ель. В северной части республики ель конкурентоспособней дуба, который как представитель неморальной растительности в этих условиях более уязвим. При этом большую роль играют и другие древесные виды, встречающиеся в дубравах, особенно быстрорастущие мягколиственные, способные заглушать дуб. Установление направленности сукцессионных процессов в дубравах позволит сделать прогноз развития этих лесов на будущее.

Цель исследования – анализ видовой структуры дубовых древостоев северной части республики и прогноз их развития.

Объекты и методика исследований. Анализ составов дубовых насаждений в условиях Западно-Двинского геоботанического округа подзоны дубово-темнохвойных подтаежных лесов проведен на примере Дисненского лесхоза, расположенного в северной части Беларуси.

Установление структурно-функциональных особенностей насаждений основано на данных с использованием поведельной базы с учетом знаний основополагающих закономерностей, принятых в лесоводстве, лесной таксации и экологии. Методика исследований базируется на общепринятых лесоводственных, лесотаксационных и биоценологических методах [2], [3]. Анализ материала проводился системно [4].

Результаты исследований и их обсуждение. Дубовые насаждения Дисненского лесхоза занимают площадь 448,8 га. В составе дубовых лесов преобладают (94,6 % площади) смешанные насаждения, в которых в разнообразных сочетаниях представлено от 3 до 7, иногда 9 древесных видов. Дубовые насаждения различных типов леса как естественного, так и искусственного происхождения характеризуются разнообразием долевого участия дуба в их составах.

Плакорные дубравы лесхоза представлены в основном дубравами кисличными, занимающими более 67 % площади всех дубрав лесхоза.

В дубравах кисличных широко распространены насаждения с долевым участием дуба в количестве 3–5 единиц состава (рисунок 1).

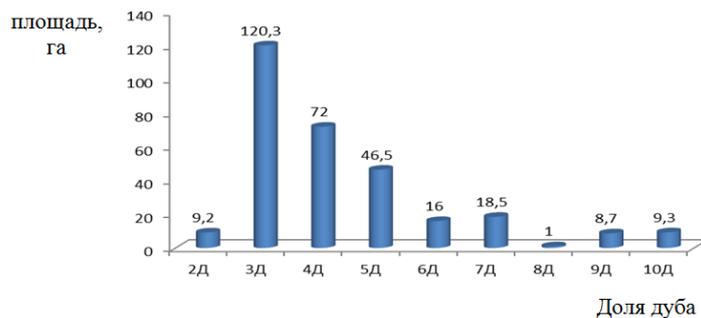
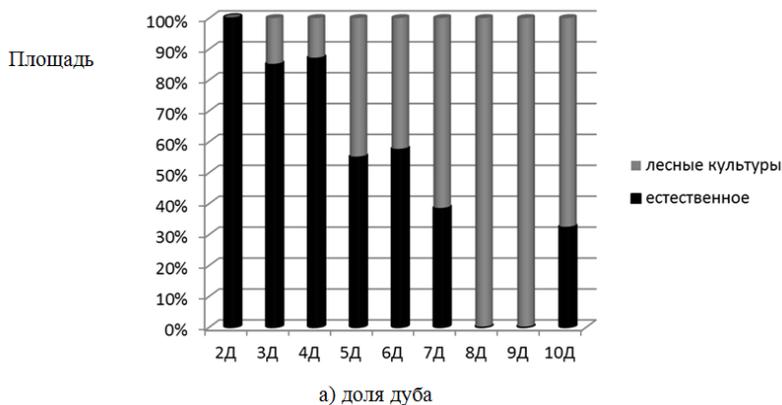
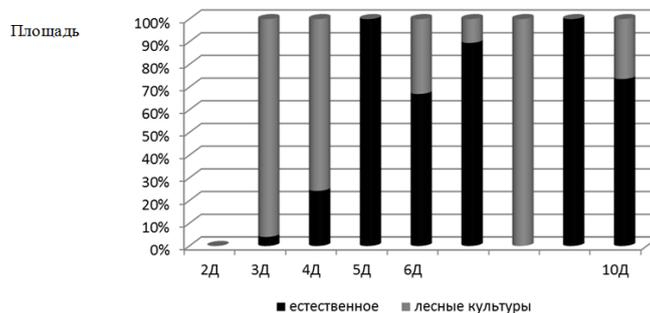


Рисунок 1 – Распределение площади дубрав кисличных по долевному участию дуба в составах

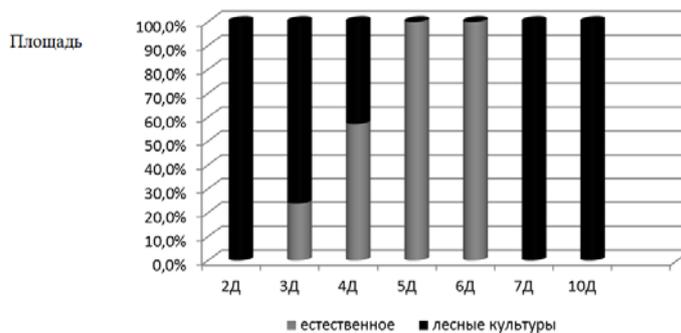
Распределение площади дубовых насаждений наиболее распространенных типов леса по происхождению при различном долевым участии дуба представлено на рисунке 2.



а) доля дуба



б) доля дуба



в) доля дуба

Рисунок 2 – Распределение площади дубовых насаждений по происхождению при разном долевым участии дуба: а) дубрава кисличная, б) дубрава снытевая, в) дубрава орляковая

В дубравах кисличных насаждения естественного происхождения составляют 73 % от площади дубовых насаждений этого типа леса, в дубравах орляковых и черничных, наоборот, преобладают насаждения искусственного происхождения, составляя 66 % и 87 % соответственно.

В дубравах снытевых насаждения естественного происхождения и лесные культуры составляют 43 и 57 % соответственно.

Дубравы снытевые с наличием дуба в количестве 3–4 единиц состава на 86 % площади представлены лесными культурами, дубравы орляковые – в среднем – на 60 %. В то же время в дубравах кисличных, наоборот, преобладают насаждения естественного происхождения (86 % площади).

Средние составы дубовых насаждений кисличного типа леса Дисненского лесхоза на различных этапах лесовыращивания показаны в таблице.

Таблица – Средние составы дубрав кисличных Дисненского лесхоза

Возраст, лет	Средний состав	Площадь, га
до 10 лет	4Д3Е2Ос1Б	18,7
11–20	6Д4Е+Ос	14,6
21–30	Один участок лесных культур 4Д5Олс1Б+Е	0,9
31–40	участки отсутствуют	–
41–50	4Д1Е3Ос1Б1Олс+Я,С,Лп,Ивд,Олч	38,9
51–60	5Д1Е1Б1Ос2Олс+Я,Кл,С,Лп,Олч,Т	87,1
61–80	5Д1Е1С2Ос1Б+Я,Олс,В,Олч	96,0
81–100	3Д2Е2Б2Ос1С+Кл,Я,Олс	31,9
101–120	4Д2Б3Ос1Е+Я,Олч,Кл,Олс	5,2
старше 121 года	7Д2Е1Ос+Б,Лп,Олч	8,7
Итого		302,0

Установлено, что в дубравах кисличных 57 % дубовых молодняков I класса возраста имеют составы с долевым участием дуба 2–3 единицы, из них 22 % насаждений являются лесными культурами. Насаждения с 10 единицами состава относятся в основном к молоднякам до 10 лет.

Следует отметить, что составы насаждений одного возрастного периода могут иметь отличия в зависимости от происхождения. Так, в дубравах кисличных в возрасте 51–60 лет средний состав лесных культур (по данным 18 выделов, общей площадью 37,2 га): 6Д1Е2Олс1Б+Ос, Т, Я, Олч, а средний состав насаждений естественного происхождения того же возраста и типа леса (по данным 21 выдела, общей площадью 49,9 га): 4Д1Е2Б1Ос2Олс+Я, Кл, Лп, С, Олч.

В дубравах снытевых молодняки занимают площадь 1,8 га и представлены лесными культурами с долей дуба 4 и 6 единиц.

В дубравах орляковых насаждения с долевым участием дуба в количестве 2–3 единиц состава занимают ½ их площади, из них 55 % это молодняки, в основном I класса возраста искусственного происхождения.

Дубравы черничные встречаются на площади 17,5 га или 4 % площади дубрав Дисненского лесхоза. Они представлены в основном насаждениями с долевым участием дуба 3–4 единицы состава (около 90 % площади дубрав черничного типа леса лесхоза) и в большей части имеют искусственное происхождение (84 % площади).

При анализе составов дубовых насаждений различных типов леса одной из задач являлось выявление древостоев, в которых имеется угроза нежелательной смены пород. Поэтому наше внимание, прежде всего, обращено на насаждения, имеющие в своем составе 2–4 единицы дуба. На рисунке 3 показана частота встречаемости древесных видов в составах дубовых насаждений наиболее распространенного типа леса.

На 90 % площади насаждений с участием дуба 2–4 единицы состава в разных вариациях вместе с дубом постоянно присутствуют осина, ель и береза, которые часто определяют направленность сукцессий. Существенное влияние на дуб имеют сосна, которая встречается на 50 % площади и ольха серая (примерно на 40 % площади) и другие древесные виды.

Поскольку в Дисненском лесхозе дубравы с долей дуба 2 единицы состава представлены незначительно (Д. кис – 9,2 га, Д. орл. – 1,0 га, а в Д. сн. и Д. чер. – отсутствуют), анализ составов по данным повыделной базы дубовых насаждений лесхоза в возрасте до 85 лет проведен для древостоев с долей дуба 2–3 единицы состава.

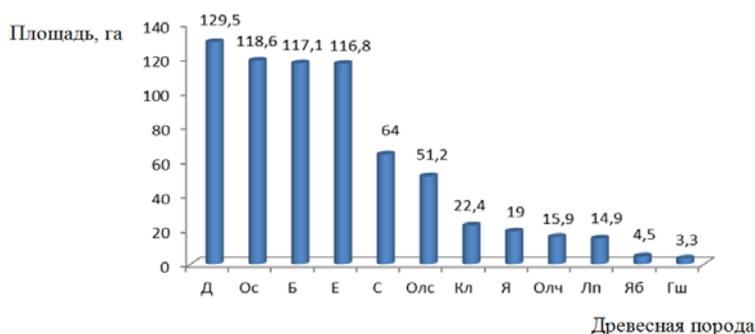


Рисунок 3 – Частота встречаемости древесных видов в дубравах кисличных северной части Беларуси с долевым участием дуба в количестве 2–4 единиц состава

Наиболее распространенные типы дубрав (кисличная, орляковая, снытевая и черничная) занимают 432,0 га, из них 1/3 площади – насаждения с долей дуба 2–3 единицы состава. В этих древостоях ценотическое влияние второстепенных пород и ели на дуб по сравнению с насаждениями, где дуб представлен в большем количестве, усиливается, что создает вероятность нежелательной смены пород. В результате анализа составов этих древостоев установлено, что примерно на 50 % их площади дуб имеет все шансы сохраниться, т. к. в насаждениях наряду с дубом примерно в равных с ним количествах присутствуют ель (сосна), ясень и другие породы. Доля мягколиственных видов, как правило, не превышает доли дуба.

В то же время на 1/2 площади имеется вероятность нежелательной смены пород, из них с дальнейшей трансформацией составов в сторону формирования мягколиственных насаждений, в которых участие березы, осины и ольхи серой примерно в равных соотношениях – 20 %, осинников – 13 %, ельников – 8 % и березняков – 7 %.

Заключение. Дубравы северной части республики (на примере Дисненского лесхоза) имеют в основном смешанный состав. Наряду с дубом в разнообразных сочетаниях встречается от 3 до 7, иногда 9 древесных видов. Совместно с дубом в этих условиях практически всегда произрастают ель, береза и осина. Дубовые насаждения различных типов леса как естественного, так и искусственного происхождения характеризуются разнообразием долевого участия дуба в их составах.

В дубравах, в которых дуб составляет менее 4 единиц состава, наибольшее ценотическое влияние на него имеют береза, осина и ель, встречающиеся на 90 % площади, в меньшей степени оказывают влияние на дуб сосна (50 % площади) и ольха серая (40 % площади).

В этих условиях ель характеризуется высокой устойчивостью, и является не только конкурентом дуба, но и ограничивает широкую представленность в составах насаждений мягколиственных видов.

Вероятность нежелательной смены пород в этих насаждениях без своевременных и регулярных рубок ухода высока примерно на 1/2 их площади с возможной трансформацией составов по направлению формирования смешанных мягколиственных насаждений с участием березы, осины и ольхи серой, а также чистых осинников, ельников и березняков.

Литература

1. Лазарева, М. С. Фитоценотические взаимоотношения древесных видов в производных мелколиственных насаждениях Беларуси / М. С. Лазарева, Л. К. Климович, В. М. Ефименко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2013. – № 5 (80). – С. 105–111.
2. Багинский, В. Ф. Лесная таксация : учебник / В. Ф. Багинский. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2018. – 365 с.
3. Сукачев, В. Н. Основы лесной типологии и биоценологии / В. Н. Сукачев. – Москва : Наука, 1972. – Т. 1. – 418 с.
4. Багинский, В. Ф. Применение системного анализа в лесном хозяйстве / В. Ф. Багинский. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – 157 с.

Обследование территории республиканского биологического заказника «Днепро-Сожский» с целью изучения распространения инвазивных чужеродных видов растений

М.С. ЛАЗАРЕВА, А.Е. ПАДУТОВ, Н.В. МАЛЬЦЕВА

В результате обследования территории республиканского биологического заказника «Днепро-Сожский» выявлено наличие и характер распространения особо агрессивных инвазивных видов: клена ясенелистного, золотарника канадского и эхиноцистиса лопастного. Предложены меры по их уничтожению и регулированию численности.

Ключевые слова: инвазивные виды, распространение видов, регулирование численности, клен ясенелистный, золотарник канадский, эхиноцистис лопастной.

As a result of the survey of the territory of the republican biological reserve «Dnepro-Sozhsky», the presence and distribution pattern of especially aggressive invasive species was revealed: ash-leaved maple, canadian goldenrod and lobed echinocystis. Measures are proposed for their destruction and regulation of their numbers.

Keywords: nature reserve, invasive species, species distribution, population regulation, ash-leaved maple, canadian goldenrod, echinocystis lobed.

Введение. В настоящее время значительная часть природной среды, в том числе леса, луга, водно-болотные объекты и др. сильно изменены человеком. Одним из способов сохранения коренных сообществ и, следовательно, свойственного им биологического разнообразия, является организация особо охраняемых природных территорий, таких как заповедники, национальные парки, заказники и др., с ограничением ведения хозяйства в них.

В последнее годы особую актуальность приобрела проблема инвазии (внедрения) в природные экосистемы чужеродных видов путём самостоятельного расселения как после предшествующей их интродукции, так и без таковой, что нередко создает угрозу существования местным (аборигенным) видам и приводит к серьезнейшим экологическим, социальным и экономическим последствиям. К сожалению, эта проблема является актуальной и для отдельных особо охраняемых природных территорий.

Оказавшись в новой среде инвазивные виды часто размножаются в больших количествах, могут являться переносчиками возбудителей заболеваний аборигенных видов или сами вызывать их заболевания, могут приводить к жёсткой конкуренции с местными видами, подавлять или полностью их вытеснять, что приводит к упрощению структуры местных сообществ и снижению их устойчивости к внешним воздействиям.

На территории Беларуси произрастает более 300 видов инвазивных (чужеродных) растений. К группе особо агрессивных инвазивных видов относятся: Борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.), Борщевик Мантегацци (*Heracléum mantegazzianum*), Золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.), Эхиноцистис лопастной (*Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et Gray.), Клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и Робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.) [1], [2].

Цель исследования – обследование территории республиканского биологического заказника «Днепро-Сожский» с целью изучения распространения инвазивных чужеродных видов растений.

Объекты и методика исследований. Объектами исследований являются инвазивные чужеродные виды растений в луговых экосистемах государственного природоохранного учреждения «Республиканский биологический заказник «Днепро-Сожский».

Проведение обследования с целью выявления на территории заказника особо опасных инвазивных растений проводилось в несколько этапов.

Первым этапом исследований являлся сбор информации о наличии чужеродных видов на территории заказника с последующей проверкой полученных сведений.

Второй этап – разработаны маршрутные ходы обследования территории заказника.

Третьим этапом работы для определения численности чужеродных видов являлась закладка учетных площадок с проведением сплошного пересчета растений на них. Выбор мест закладки учетных площадок осуществлялся случайным способом в зависимости от размера куртины.

На заключительном этапе работы проведена камеральная обработка экспериментальных данных и разработаны рекомендации по регулированию численности чужеродных инвазивных видов.

Результаты исследований и их обсуждение. Заказник «Днепро-Сожский» образован в соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 05 августа 1999 г. № 1221 «Положение о республиканском биологическом заказнике «Днепро-Сожский» и является особо охраняемой природной территорией республиканского значения. Создан заказник с целью сохранения ценных лесных формаций и луговых сообществ с комплексами редких и исчезающих видов растений и животных, занесенных в Красную книгу Республики Беларусь в междуречье Днепра и Сожа. Территория заказника на 80 % занята лесами, она является ареалом 140 видов птиц, в заказнике произрастает более 660 видов растений. Для туристов разработаны экологические маршруты по лугам и лесам заказника.

Заказник «Днепро-Сожский» расположен на территории Лоевского административного района Гомельской области. Особо охраняемая природная территория представлена в основном лесным массивом, вытянутым в направлении юго-восток – северо-запад. Общая площадь заказника «Днепро-Сожский» составляет – 14556,0 гектаров.

В ходе проведения полевых исследований на территории заказника выявлены места произрастания клена ясенелистного, золотарника канадского и эхиноцистиса лопастного, являющихся особо агрессивными чужеродными видами. Клен ясенелистный, проникая на луга и пустоши, закусаривает их, золотарник канадский – наносит вред лугам, ухудшая пищевую ценность заготавливаемых кормов, а эхиноцистис лопастный, известный в народе как бешеный огурец, произрастая преимущественно в поймах рек, оплетает традиционную растительность, угнетая ее и зачастую приводя к гибели.

Клен ясенелистный (*Acer negundo* L.). На территории Днепро-Сожского заказника выявлено 10 участков произрастания клена ясенелистного (рисунок 1). На участке Хоминка 2 куртина клена ясенелистного имеет форму вытянутой полосы площадью 0,08 га. Участки с наличием клена ясенелистного выявлены также в районах Хоминка 5, Карповка 2, Карповка 7, Рудня Каменева 3, Рудня Каменева 6, Первомайск 1, Первомайск 2, Первомайск 3 и Абакумы 3.

Заложены учетные площадки 0,01 га (10 × 10 м) и сделан сплошной пересчет растений по ступеням толщины. Высота растений варьировала в пределах от 0,5 до 4,5 метров. Густота в среднем составляла 13 тысяч штук на 1 га.

На всех участках данный вид образует густые кустарниковые заросли, представленные в основном растениями порослевого происхождения. Способность клена ясенелистного быстро захватывать территории обусловлена биологическими особенностями этого вида: быстротой роста и высокой способностью к вегетативному возобновлению как порослью от пня, так и обильными корневыми отпрысками. Корень после отмирания дерева продолжает жизнедеятельность. Клен ясенелистный отличается широкой экологической амплитудой.

КАРТА ЗАКАЗНИКА РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗНАЧЕНИЯ
«ДНЕПРО-СОЖСКИЙ»
(Доевский район, Гомельская область)

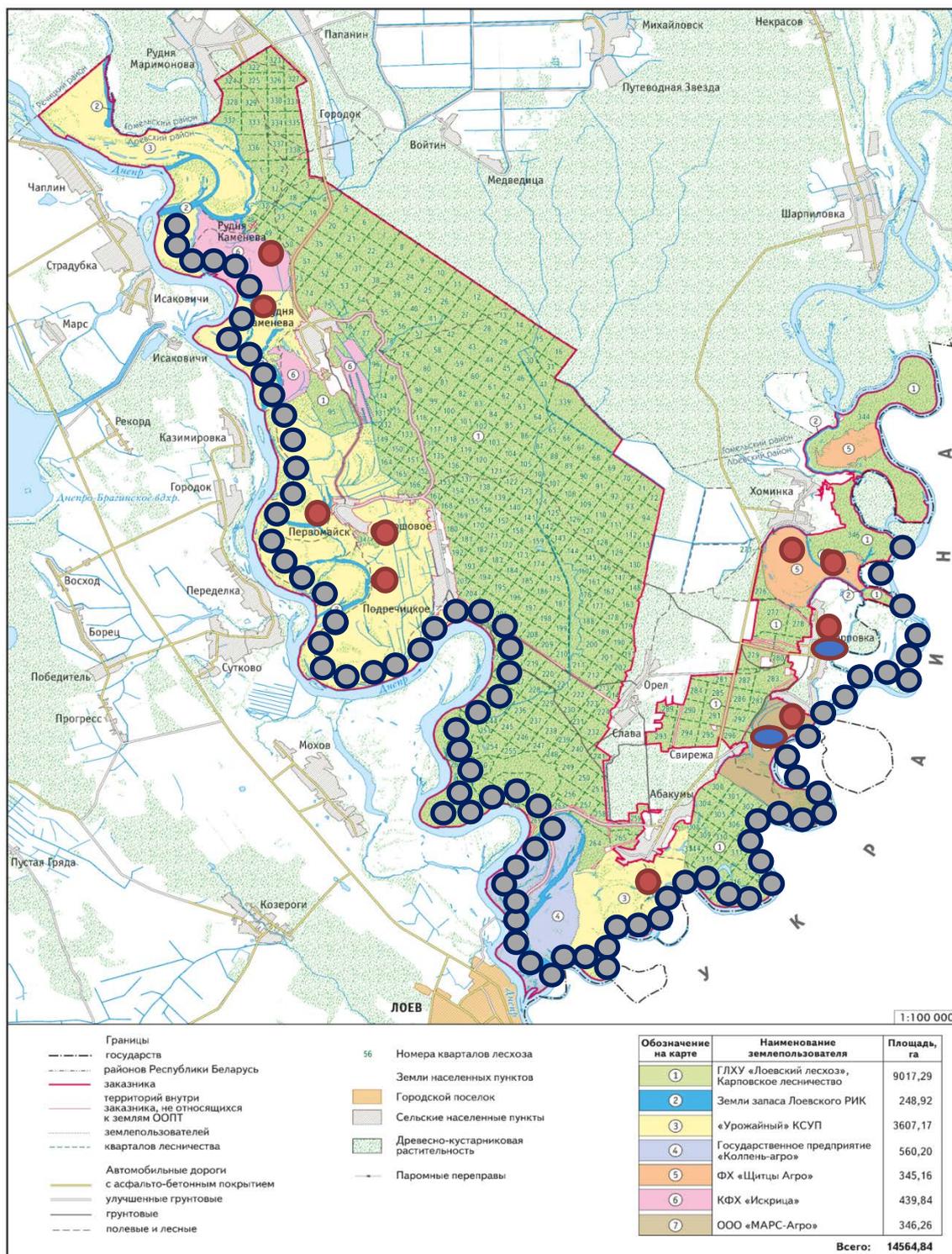


Рисунок 1 – Локализация инвазивных видов растений на территории Днепро-Сожского заказника:

● – клен ясенелистный; ● (красно-синий) – золотарник канадский; ● (синий) – эхиноцистис лопастной

Золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.). Установлено, что этот вид встречается на территории заказника sporadically. Выявлено два участка произрастания этого вида (рисунок 1).

По оценкам отдельных авторов в последние годы опасность от данного растения возросла [3]. Золотарник канадский значительно увеличил свою численность (в среднем на 15–20 %), расширился и ареал распространения, что приводит к трансформациям природных комплексов.

Золотарник канадский является карантинным растением, запрещенным к перемещению через границы и ввозу во многие страны. В этой связи, несмотря на незначительную численность и распространение этого вида на территории заказника необходимо принять меры по его удалению.

Эхиноцистис лопастной (*Echinocystis lobata (Michx.) Torr. et Gray.*). На основе маршрутного обследования установлено, что эхиноцистис лопастной произрастает по всей береговой линии реки Сож от выхода из Хоминского старика и до впадения в реку Днепр. А также по береговой линии реки Днепр от Рудни до устья реки Сож (рисунок 1).

Необходимо отметить, что в заказнике эхиноцистис лопастной произрастает по самому урезу воды, перебираясь на сушу метра на 2–3 от воды. Эта лиана затягивает всю прибрежную растительность, в том числе высокую надводную, береговой кустарник у уреза воды, и даже заросли ив, стоящие в воде.

Такое местопроизрастание, по-видимому, свидетельствует о том, что «бешенный огурец» попал сюда водным путем из каких то дачных поселков, расположенных выше по течению. Борщевики и робиния лжеакация на территории заказника выявлены не были.

Таким образом, при обследовании территории республиканского биологического заказника «Днепро-Сожский» выявлено наличие участков с кленом ясенелистным, золотарником канадским и эхиноцистисом лопастным, которые являются особо опасными инвазивными видами растений в Беларуси и должны быть оперативно уничтожены.

Удаление деревьев и кустарников, относящихся к видам, распространение и численность которых подлежат регулированию, осуществляется на основании акта о наличии места произрастания растений, относящихся к видам, распространение и численность которых подлежат регулированию, в порядке и на условиях, определенных в части пятнадцатой ст. 37 Закона Республики Беларусь от 14 июня 2003 г. № 205-З «О растительном мире» [4].

Акт оформляется пользователем земельного участка, в границах которого произрастают указанные деревья, кустарники в двух экземплярах и подписывается пользователем земельного участка и представителем региональной ГРИ ПР и ООС. Копия акта о наличии места произрастания растений, относящихся к видам, распространение и численность которых подлежат регулированию в день его оформления, направляется пользователем земельного участка в местный исполнительный и распорядительный орган.

Для удаления зарослей клена ясенелистного необходимо сочетание двух методов: механического удаления надземной части и дальнейшей химической обработки системными гербицидами появившейся молодой поросли, для засушивания корневых систем. Возможно, эту комплексную обработку (механическую и химическую) потребуются повторить несколько раз. Начинать с химической обработки нерентабельно, т. к. расход гербицида слишком большой.

После регулирования распространения и численности видов растений путем их удаления территория, на которой оно проводилось, засеивается различными по составу травосмесями.

Согласно ст. 9 Закона Республики Беларусь «О растительном мире», пользователи земельных участков или водных объектов, как юридические, так и физические лица, обязаны проводить работы по регулированию распространения и численности инвазивных чужеродных видов растений.

В зависимости от занимаемой растениями площади, плотности их произрастания, степени угрозы жизни и здоровью граждан, окружающей среде, количества мест их произрастания выделяются следующие способы регулирования распространения и численности видов растений (за исключением деревьев и кустарников):

1) ручной способ, который заключается:

– в перерубании корней растений лопатой на минимальной глубине 10 см и удалении растений. Производится два раза в год (ранней весной и в середине лета). Удаление растений этим способом должно производиться до начала цветения. Данный способ применяется при удалении единичных растений или небольших популяций (до 200 растений);

– в скашивании растений, в том числе в труднодоступных для техники местах, по обочинам дорог, на участках под лесопосадками, канавами, на приусадебных участках, в парках.

Скашивание необходимо производить не менее трех раз в сезон начиная с весны до начала цветения растений;

2) механический способ, который заключается в удалении растений с использованием техники, и может применяться для удаления популяций растений, в том числе вдоль автомобильных дорог и железнодорожных путей, на землях населенных пунктов. Удаление растений этим способом производится не менее трех раз в сезон начиная с весны до начала цветения растений;

3) химический способ, который заключается в применении пестицидов в соответствии с законодательством. Применять пестициды необходимо ранней весной в период начала вегетации растений (фаза розетки листьев) и повторно – после скашивания растений в начале отрастания листьев. Необходимость повторного применения пестицидов определяется количеством вегетирующих растений. После обработки пестицидами применяется глубокая вспашка сельскохозяйственных территорий с оборотом пласта.

Мерами борьбы с золотарником является не менее чем двухкратное в течение года (в мае и августе) скашивание растений. При этом обязательным является удаление и утилизация скошенных растений из-за высокой способности семян дозревать в земле и давать всходы на следующий год. Хорошо себя зарекомендовало перекапывание почвы в летнее время при отсутствии осадков.

Эффективной мерой борьбы с золотарником является применение гербицидов, но только при высоте растений не более 10–15 см, так как позднее чувствительность золотарника к ним снижается.

Для ликвидации эхиноцистиса лопастного химическая обработка недопустима. Попадание гербицида в воду не допустимо. Механическое удаление плетей лианы опутавших растения и кустарники, тоже невозможно. Необходимо ручное выкорчевывание со снятием плетей с растений. Однако, доступ к некоторым участкам произрастания «бешеного огурца» с суши практически невозможен, особенно в случае, когда это растение растет на водной растительности. Использование легкой лодки ПВХ с жестким транцем для возможности крепления лодочного мотора (береговая линия достаточно большая), позволит не только решить вопрос подхода к растениям для их удаления, но и временного складирования удаленных растений, а также их транспортировки к месту утилизации. Утилизацию удаленных растений желателно проводить путем их сжигания.

Заключение. В результате обследования территории республиканского биологического заказника «Днепро-Сожский» выявлены наличие и характер распространения особо опасных инвазивных чужеродных видов растений: клена ясенелистного, золотарника канадского и эхиноцистиса лопастного, и предложены мероприятия по регулированию их численности.

Литература

1. Масловский, О. М. Экспансия и особенности пространственного распределения наиболее опасных видов инвазивных растений на территории Республики Беларусь / О. М. Масловский [и др.] // Ботаника: (исследования): сб. науч. тр. / Национальная академия наук Беларуси, Отделение биологических наук [и др.]; редкол.: акад. НАН Беларуси, проф. Н. А. Ламан [и др.]. – Минск : Колорград, 2016. – Вып. 45. – С. 129–144.

2. Соколова, А. В. Инвазивные виды растений на территории Беларуси (на примере ГС «Западная Березина») / А. В. Соколова, Я. А. Макарова // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию фак. географии и геоинформатики Белорус. гос. ун-та и 65-летию Белорус. геогр. о-ва, Минск, 13–15 нояб. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2019. – С. 438–442.

3. Лунева, Н. Н. Золотарник канадский – следующий / Н. Н. Лунева, С. Ю. Ларина // Защита и карантин растений. – 2015. – № 1. – С. 17–19.

4. О растительном мире : Закон Республики Беларусь, 14 июня 2003 г., № 205-З : в ред. Закона Респ. Беларусь от 18.12.2018 г., № 153-З // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2003. – 2/2591.

Новые флористические находки редких и охраняемых аборигенных видов на территории Беларуси

А.Н. МЯЛИК, А.В. КРУЧОНОК, А.Л. ГУЛИС

В статье приводятся новые данные о распространении некоторых редких (*Scirpoides holoschoenus* (L.) Soják, *Dactylis polygama* Horv. и др.) и охраняемых (*Corallorhiza trifida* Châtel., *Thesium ebracteatum* Hayne и др.) аборигенных видов на территории Беларуси. Всего представлены сведения о 66 новых находках для 46 видов, что расширяет сведения о их распространении, численности и условиях произрастания в Беларуси. Один гибридогенный вид (*Equisetum* × *moorei* Newman) для флоры Беларуси указывается впервые.

Ключевые слова: флора Беларуси, аборигенные виды, новые находки.

New data on the distribution of some rare (*Scirpoides holoschoenus* (L.) Soják, *Dactylis polygama* Horv. etc.) and protected (*Corallorhiza trifida* Chatel., *Thesium ebracteatum* Hayne, etc.) native species on the territory of Belarus are presented. In total, 66 new findings are reported for 46 species, which expands information about their distribution, abundance, and growing conditions in the Republic of Belarus. One hybridogenic species (*Equisetum* × *moorei* Newman) for the flora of Belarus is indicated for the first time.

Keywords: flora of Belarus, native species, new findings.

Введение. В настоящее время работы, касающиеся дальнейшего изучения аборигенной флоры Беларуси, по-прежнему не теряют своей актуальности и значимости. Обусловлено это в первую очередь тем, что не смотря на достаточно высокую степень флористической изученности территории республики, не до конца выясненными остаются вопросы, касающиеся систематики, хорологии и экологии, флогенетического и созологического статуса ряда видов и отдельных таксономических групп. В соответствии с этим поиск и документация новых местонахождений редких, уязвимых, хорологически детерминированных и охраняемых видов растений имеют важное значение для более глубокого познания аборигенной флоры Беларуси, выявления происходящих в ней изменений, а также разработки путей рационального использования ресурсов растительного мира.

В связи с вышесказанным определяется актуальность и цель данной работы – предоставить для широкого круга исследователей характеристику новых мест произрастания редких и охраняемых аборигенных видов на территории Беларуси.

Материалы и методы исследования. Материалами к написанию работы послужили результаты собственных флористических исследований, выполненных авторами в различных природных регионах Беларуси в 2019–2020 гг. маршрутными и полустационарными методами. Идентификация собранных образцов проводилась по определительным ключам [1], [2], [3], [4], [5]. Гербаризация растений выполнена согласно общепринятым подходам и методикам [6], [7] с учетом минимального отрицательного воздействия на популяции охраняемых видов. Большинство собранных образцов хранится в фондах Гербария Центрального ботанического сада НАН Беларуси (MSKH), часть дублетов переданы в гербарии Института экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича НАН Беларуси (MSK), Белорусского государственного университета (MSKU), Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (MW) и Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН (LE).

Описание приводимых местонахождений выполнено по следующему плану: расположение находки в системе административно-территориального устройства Республики Беларусь (при необходимости привязка к физико-географическим объектам и местным урочищам); точные географические координаты; условия произрастания вида и его численность; автор находки и дата; ссылка на акроним гербария, где хранится образец (при отсутствии отобранного гербарного образца может приводиться № наблюдения в информационной си-

стеме iNaturalist [8]); при необходимости дополнительные пояснения. Видовой перечень флористических находок приведен в алфавитном порядке, латинские названия таксонов даны согласно информационной базе данных The Plant List [9].

Результаты и их обсуждение. Флористические исследования были выполнены на территории различных административных районов Брестской, Витебской, Гомельской, Гродненской и Минской областей. В результате их проведения было собрано более 5000 гербарных листов, а также задокументировано около 2000 наблюдений в системе iNaturalist, что позволяет получить дополнительные данные о распространении и состоянии популяций ряда аборигенных видов растений. Ниже приводится описание новых флористических находок редких, хорологически детерминированных и охраняемых видов. При характеристике местонахождений использованы следующие сокращения: В – восток; г. – город; д. – деревня; ж.-д. – железнодорожный; З – запад; зак. – заказник; км – километр; обл. – область; оз. – озеро; окр. – окрестности, окраина; р. – река; р-н – район; С – север; ст. – станция; уроч. – урочище; хут. – хутор; Ю – юг. После названия вида указывается его созологический статус (согласно 4-му изданию Красной книги Республики Беларусь: I, II, III, IV категории охраны, проф. охр.– виды из списка профилактической охраны) [10], либо категория редкости (рег. редк. – редкий в регионе, хор. дет. – хорологически детерминированный).

***Allium angulosum* L. – Лук угловатый (хор. дет.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'20.2"N 28°32'40.4"E; отмель старицы, не редко; А.Н. Мялик, 30.06.2019; MSKH, MSKU, MW. (в выявленном местонахождении вид произрастает на северо-западной границе ареала).

***Aristolochia clematitis* L. – Кирказон ломоносовидный (хор. дет.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'20.2"N 28°32'40.4"E; разреженный смешанный лес на песчаных холмах у речной старицы, не редко; А.Н. Мялик, 30.06.2019; MSK, MSKH, MW. (в указанном местонахождении вид находится на северо-западной границе ареала).

***Armeria vulgaris* Willd. – Армерия обыкновенная (хор. дет.).**

Брестская обл., Барановичский р-н, д. Лесная, окр. ж.-д. ст.; 52°58'52.1"N 25°46'09.2"E, травянистая луговина, очень часто; А.Н. Мялик, 01.09.2019; LE, MSK, MSKH, MSKU, MW.

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Могилыцы, 1,7 км к СЗ, долина р. Щара; 52°47'15.1"N 25°34'20.9"E; умеренно-влажная луговина на надпойменной террасе, изредка; А.Н. Мялик, 23.06.2019; LE, MSK, MSKH, MW.

Брестская обл., Пинский р-н, д. Клинь, 0,5 км к С, у ж.-д. насыпи; 52°11'04.2"N 26°16'43.8"E; сухая остепненная луговина, редко; А.Н. Мялик, 30.06.2019; MSKH. (в указанных местонахождениях вид находится на восточной границе ареала).

***Berula erecta* (Huds.) Coville – Берула прямая (III).**

Гродненская обл., Щучинский р-н, д. Подбершты, 1,5 км к СВ, р. Котра, зак. «Котра»; 53°52'10.0"N 24°25'02.4"E; илистый берег, изредка; А.Н. Мялик, 27.08.2020; MSKH.

Минская обл., Логойский р-н, д. Прушевичи, 2,6 км к С, долина р. Цна; 54°33'39.7"N 28°00'39.5"E; топкий берег лесного ручья, изредка; А.Н. Мялик, 31.10.2019; MSKH.

***Campanula latifolia* L. – Колокольчик широколистный (IV).**

Витебская обл., Лепельский р-н, окр. д. Заозерье; 55°00'13.90"N 28°24'13.91"E, ольшаник у края дороги, часто; А.В. Кручонок, 30.07.2019; MSKH.

Минская обл., Логойский р-н, окр. д. Малые Бесяды, долина р. Удра; 54°14'11.00"N 27°29'52.37"E, ольшаник в пойме р., редко; А.В. Кручонок, 10.06.2020.

***Chondrilla juncea* L. – Хондрилла ситниковая (хор. дет.).**

Брестская обл., Барановичский р-н, д. Лесная, ЮЗ окр.; 52°58'23.9"N 25°45'35.4"E; сухая остепненная луговина у ж.-д., изредка; А.Н. Мялик, 01.09.2019; MSK, MSKU. (в указанном местонахождении вид находится на северной границе ареала).

***Corallorhiza trifida* Châtel. – Ладьян трехнадрезный (II).**

Витебская обл., Миорский р-н, д. Хутор Дедино, 1,6 км к Ю, зак. «Болото Мох»; 55°38'41.8"N 27°26'47.2"E; ельник сфагновый с примесью березы, изредка; А.В. Кручонок, А.Н. Мялик, 08.06.2020; № iNaturalist 48911951.

***Cucubalus baccifer* L. – Волдырник ягодный (IV).**

Витебская обл., Миорский р-н, д. Крупенище, 1,0 км к ЮВ, зак. «Жада»; 55°27'00.9"N 27°57'57.9"E; опушка смешанного леса, редко; А.Л. Гулис, И.А. Агейчик, 04.08.2020.

***Cypripedium calceolus* L. – Венерин башмачок настоящий (III).**

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Вулька Телеханская, 5,3 км к ЗСЗ; 52°33'30.9"N 25°47'98.9"E; смешанно-широколиственный лес, изредка; А.Н. Мяслик, 06.07.2019; MSKH.

***Dactylis polygama* Horv. – Ежа многобрачная (хор. дет.).**

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Вулька Телеханская, 5,3 км к ЗСЗ; 52°33'30.9"N 25°47'98.9"E, смешанно-широколиственный лес, изредка; А.Н. Мяслик, 06.07.2019; MSKH.

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Выгоноши, 6,5 км к ВСВ, зак. «Выгонощанское»; 52°38'15.1"N 26°00'23.3"E; широколиственный лес на минеральном острове среди болота, часто; А.Н. Мяслик, А.В. Кручонок, 06.07.2020; MSKH, MW. (в указанных местонахождениях вид произрастает на восточной границе ареала).

***Dactylorhiza maculata* (L.) Soó – Пальчатокоренник пятнистый (проф. охр.).**

Брестская обл., Пинский р-н, д. Масевичи, 2,0 км к ССВ, долина р. Ясельда; 52°15'51.6"N 25°59'28.1"E; вересковая пустошь, часто; А.Н. Мяслик, 28.06.2020; MSK, MSKH, MSKU.

***Digitalis grandiflora* Mill. – Наперстянка крупноцветковая (проф. охр.).**

Гомельская обл., Мозырский р-н, д. Провтюки, 2,6 км к ЮЮЗ; 51°53'36.7"N 29°21'45.1"E; сухая опушка смешанного леса, изредка; А.Н. Мяслик, 05.10.2020; MSKH.

***Epipactis palustris* (L.) Crantz – Дремлик болотный (проф. охр.).**

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Вулька Телеханская, 4,6 км к СЗ; 52°33'18.1"N 25°48'21.0"E; разнотравная умеренно-увлажненная поляна в смешанно-широколиственном лесу, изредка; А.Н. Мяслик, 06.07.2019; MSK, MSKH, MSKU. (для Ивацевичского р-на вид указывается впервые).

Витебская обл., Глубокский р-н, д. Санники, Ю окр.; 55°18'38.4"N 28°11'33.7"E; закустаренный низкотравный луг на моренном холме, редко; И.А. Агейчик, А.Л. Гулис, А.В. Кручонок, А.Н. Мяслик, 05.08.2020; MSKH.

***Equisetum × moorei* Newman – Хвощ Мура (рег. редк.).**

Минская обл., Солигорский р-н, д. Старые Терушки, 2,0 км к СВ; 52°48'05.0"N 27°44'45.8"E; травянистые места у берега пруда, не редко; А.Н. Мяслик, 30.07.2020; № iNaturalist 54852992. (для флоры Беларуси этот гибридогенный вид (*Equisetum hyemale* L. × *Equisetum ramosissimum* Desf.) указывается впервые).

***Euphorbia uralensis* Fisch. ex Link – Молочай уральский (хор. дет.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'23.8"N 28°32'47.5"E, закустаренный пойменный луг, редко; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSK, MSKH. (в выявленном местонахождении вид находится в крайней западной точке ареала).

***Genista germanica* L. – Дрок германский (IV).**

Гомельская обл., Мозырский р-н, д. Провтюки, 2,6 км к ЮЮЗ; 51°53'36.7"N 29°21'45.1"E; сухая опушка смешанного леса, очень часто; А.Н. Мяслик, 05.10.2020; MSKH, MSKU, MW.

***Gentiana cruciata* L. – Горечавка крестовидная (III)**

Витебская обл., Глубокский р-н, д. Санники, Ю окр.; 55°18'38.4"N 28°11'33.7"E; закустаренный низкотравный луг на моренном холме, редко; И.А. Агейчик, А.Л. Гулис, А.В. Кручонок, А.Н. Мяслик, 05.08.2020; MSKH.

***Gentiana pneumonanthe* L. – Горечавка легочная (проф. охр.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,3 км к З, долина р. Припять; 52°06'23.7"N 28°32'47.5"E; разнотравный пойменный луг, в западине, изредка; А.Н. Мяслик, 01.07.2019; MSKH, MW.

Минская обл. Крупский р-н, окр. д. Запутки; 54°27'09.72"N 29°11'43.16"E; зарастающая луговина, в понижениях, изредка; А.В. Кручонок, 29.07.2019.

***Gladiolus imbricatus* L. – Шпажник черепитчатый (IV).**

Витебская обл., Миорский р-н, д. Сухие, 2,1 км к В, зак. «Ельня»; 55°32'39.0"N 27°42'44.3"E; разнотравная поляна в смешанном лесу на краю верхового болота, редко; А.Н. Мяслик, И.А. Агейчик, 05.08.2020; MSKH.

Гродненская обл., Дятловский р-н, д. Сверлевичи, 2 км на СЗ, долина р. Подъяворка, зак. «Липичанская пуца»; 53°23'57.87"N 25°14'12.98"E; экотон ельника зеленомошного и пойменного луга, часто; А.В. Кручонок, 16.06.2019.

Минская обл., Молодечненский район, окр. д. Сысуны; 54°09'29.95"N 26°59'43.90"E; зарастающая луговина, часто; А.В. Кручонок, 25.09.2020.

Минская обл., Минский р-н, окр. д. Шершуны, долина р. Удра, памятник природы «Святые родники»; 54°12'04.47"N 27°23'10.79"E; опушка сосняка в пойме р., изредка; А.В. Кручонок, 25.09.2020.

Гродненская обл., Мостовский р-н, д. Стукалы, 1 км на СЗ, зак. «Липичанская Пуца», 53°28'03.7"N 24°51'03.2"E; пойменная дубрава, часто; А.В. Кручонок, 25.07.2019.

***Hammarbya paludosa* (L.) Kuntze – Хаммарбия болотная (II).**

Минская обл., Мядельский р-н, окр. д. Стаховцы, уроч. Чистец; 54°45'22.91"N 26°48'17.47"E; переходное болото с высокой минерализацией, часто; А.В. Кручонок, 27.07.2019.

***Hepatica nobilis* Mill. – Перелеска благородная (проф. охр.).**

Брестская обл., Ляховичский р-н, д. Совейки, усадебный парк; 52°55'03.4"N 26°24'36.9"E; под пологом парковых насаждений, редко; А.Н. Мяслик, 15.09.2019; MSK, MSKH. (в указанном местонахождении вид произрастает на южной границе ареала).

***Herniaria polygama* J. Gay – Грыжник многобрачный (хор. дет.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'23.5"N 28°32'36.1"E; отмель старицы, редко; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSKH. (в указанном местонахождении вид находится на западной границе ареала).

***Hippuris vulgaris* L. – Хвостник обыкновенный (проф. охр.).**

Гродненская обл., Гродненский р-н, д. Соболяны, 5,2 км к ЮВ; 53°47'57.5"N 24°06'33.9"E; в мелиоративной канаве среди осушенного торфяника, редко; А.Н. Мяслик, 04.10.2019; MSKH.

***Huperzia selago* (L.) Bernh. ex Schrank et Mart. – Баранец обыкновенный (IV).**

Минская обл., Борисовский р-н, д. Деделовичи, 4,8 км к ЗЮЗ, долина р. Цна; 54°33'31.3"N 28°01'21.9"E; черноольхово-еловый лес, изредка; А.Н. Мяслик, 31.10.2019; MSKH, MSKU.

Гродненская обл., Гродненский р-н, хут. Узбережь, 1,5 км к ЮВ, зак. «Чертово болото»; 53°54'49.9"N 24°15'18.1"E; тенистый ельник кисличный, изредка; А.Н. Мяслик, 27.08.2020; MSKH.

***Iris sibirica* L. – Ирис сибирский (IV).**

Гомельская обл., Житковичский р-н, д. Лагвощи, 3,4 км к ЮЗ, долина р. Случь; 52°14'08.2"N 27°33'08.3"E; разреженная разнотравная дубрава на высоком берегу р., изредка; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSKH, MW.

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'23.7"N 28°32'39.5"E; пойменная дубрава, изредка; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSKH, MSKU.

Гомельская обл., Норовлянский р-н, д. Тихин, Полесский радиационно-экологический заповедник; 51°30'58.5"N 29°37'44.1"E, зарастающая луговина, редко; А.В. Кручонок, 17.09.2019.

***Jurinea cyanooides* (L.) Rchb. – Наголоватка васильковая (проф. охр.).**

Брестская обл., Пинский р-н, д. Клинь, 0,5 км к С, у ж.-д. насыпи; 52°11'04.2"N 26°16'43.8"E; сухая остепненная луговина, изредка; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; LE, MSK, MSKH, MW. (в указанном местонахождении вид находится на северной границе ареала).

***Laphangium luteoalbum* (L.) Tzvelev – Цминница желто-белая (рег. редк.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'16.3"N 28°32'41.7"E; молодая лесопосадка сосны на песках, изредка; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSK, MSKH, MW.

***Lilium martagon* L. – Лилия кудреватая (IV).**

Брестская обл., Ляховичский р-н, д. Совейки, усадебный парк; 52°55'03.4"N 26°24'36.9"E; под пологом парковых насаждений, редко; А.Н. Мяслик, 15.09.2019; MSKH.

***Linnaea borealis* L. – Линнея северная (III).**

Гродненская обл., Щучинский р-н, д. Подбершты, 0,9 км к СВ, зак. «Котра»; 53°51'49.1"N 24°24'57.3"E; сосняк зеленомошный, на холмах, часто; А.Н. Мяслик, 27.08.2020; LE, MSK, MSKH, MSKU, MW.

***Listera ovata* (L.) R. Br. – Тайник яйцевидный (IV).**

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Вулька Телеханская, 4,6 км к СЗ; 52°33'18.1"N 25°48'21.0"E; разнотравная умеренно-увлажненная поляна в смешанно-широколиственном лесу, изредка; А.Н. Мяслик, 22.06.2019; MSKH, MW.

Витебская обл., Миорский р-н, д. Сухие, 2,1 км к В, зак. «Ельня»; 55°32'39.0"N 27°42'44.3"E; разнотравная поляна в смешанном лесу на краю верхового болота, редко; А.В. Кручонок, А.Н. Мяслик, 09.06.2020; № iNaturalist 49010988.

Витебская обл., Миорский р-н, окр. д. Хутор Дедино, СВ берег оз. Нобисто; 55°39'27.5"N 27°26'49.1"E; закустаренная влажная луговина, редко; А.В. Кручонок, А.Н. Мяслик, 08.06.2020; № iNaturalist 48916515.

***Lunaria rediviva* L. – Лунник оживающий (IV).**

Минская обл., Борисовский р-н, д. Дедиловичи, 5,1 км к ЗЮЗ, долина р. Цна; 54°33'26.3"N 28°01'02.8"E; смешанно-широколиственный лес, очень часто; А.Н. Мяслик, 31.10.2019; MSKH.

***Malaxis monophyllos* (L.) Sw. – Мякотница однолистная (II).**

Минская обл., Мядельский р-н, окр. д. Стаховцы, уроч. Чистец; 54°45'39.71"N 26°47'57.92"E; переходное болото, на заросшей сезонной дороге, часто; А.В. Кручонок, 27.07.2019.

***Melampyrum cristatum* Hablitz ex Steud. – Марьянник гребенчатый (рег. редк.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 2,9 км к З, долина р. Припять; 52°06'22.6"N 28°33'05.3"E; опушка пойменной дубравы, часто; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSK, MSKH, MW.

***Orchis mascula* (L.) L. – Ятрышник мужской (II).**

Витебская обл., Миорский р-н, д. Крупенище, 1,0 км к ЮВ, зак. «Жада»; 55°27'00.9"N 27°57'57.9"E; опушка смешанного леса, редко; А.В. Кручонок, А.Н. Мяслик, 10.06.2020; № iNaturalist 49103061.

***Polypodium vulgare* L. – Многоножка обыкновенная (IV).**

Брестская обл., Пинский р-н, д. Шпановки, 0,3 км к З; 52°20'53.6"N 25°55'07.4"E; молодая лесопосадка из сосны и березы, редко; А.Н. Мяслик, 28.06.2020; MSKH.

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Краглевицы, 1,0 км к ЮЗ; 52°28'08.8"N 25°49'11.8"E; сосняк зеленомошный, изредка; А.Н. Мяслик, 29.08.2020; LE, MSKH. (в выявленных местонахождениях вид произрастает на восточной границе ареала).

***Potentilla arenaria* Borkh. – Лапчатка песчаная (рег. редк.).**

Брестская обл., Барановичский р-н, д. Лесная, ЮЗ окр.; 52°58'23.9"N 25°45'35.4"E; склон западины у ж.-д. насыпи, изредка; А.Н. Мяслик, 01.09.2019; MSK, MSKH, MSKU, MW.

***Pulsatilla patens* (L.) Mill. – Прострел раскрытый (IV).**

Брестская обл., Барановичский р-н, д. Лесная, ЮЗ окр.; 52°58'24.5"N 25°45'32.4"E; сосняк зеленомошный, изредка; А.Н. Мяслик, 01.09.2019; MSKH, MW.

***Salvinia natans* (L.) All. – Сальвиния плавающая (IV).**

Брестская обл., Ивацевичский р-н, д. Чемелы, 1,3 км к ВСВ, долина р. Щара; 52°47'21.6"N 25°33'26.9"E; в старицах и заводях реки, очень часто; А.Н. Мяслик, 27.09.2020; MSKH, MSKU, MW. (для Ивацевичского р-на и бассейна р. Неман вид указывается впервые).

Брестская обл., Пинский р-н, г. Пинск, р. Пина, в районе старой набережной; 52°06'41.1"N 26°06'29.4"E; на мелководье вдоль берега, очень часто; А.Н. Мяслик, 09.08.2019; MSKH, MW.

***Sanguisorba officinalis* L. – Кровохлебка лекарственная (проф. охр.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 2,9 км к З, долина р. Припять; 52°06'22.6"N 28°33'05.3"E; опушка пойменной дубравы, изредка; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSK, MSKH.

***Scabiosa ochroleuca* L. – Скабиоза бледно-желтая (хор. дет.).**

Брестская обл., Березовский р-н, д. Пересудовичи, 0,7 км к З, долина р. Ясельда; 52°24'59.7"N 25°05'48.6"E; сухая луговина у дороги, часто; А.Н. Мяслик, 10.08.2019; MSK, MSKH, MW. (в указанном местонахождении вид находится на северной границе ареала).

***Scirpoides holoschoenus* (L.) Soják – Камышевидник обыкновенный (хор. дет.).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, долина р. Припять; 52°06'20.2"N 28°32'40.4"E; разреженный смешанный лес на песчаных холмах у речной старицы, часто; А.Н. Мяслик, 30.06.2019; MSK, MSKH, MW. (в выявленном местонахождении вид произрастает на северо-западной границе ареала).

***Thesium ebracteatum* Науне – Ленец бесприцветничковый (IV).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 2,9 км к З, долина р. Припять; 52°06'20.7"N 28°33'01.7"E; разнотравный луг на гриве в пойме реки, редко; А.Н. Мялик, 30.06.2019; MSKH, MW.

***Tragopogon bjelorusicus* Artemcz. – Козлобородник белорусский (проф. охр.).**

Гомельская обл., Лельчицкий р-н, д. Зарубаное, 3,7 км к З, долина р. Уборть; 51°55'38.8"N 28°31'23.6"E; открытые песчаные места в сосновом лесу, изредка; А.Н. Мялик, 01.07.2019; MSK, MSKH.

***Trapa natans* L. – Рогульник плавающий (III).**

Гомельская обл., Петриковский р-н, д. Черноцкое, 3,2 км к З, старица р. Припять; 52°06'23.5"N 28°32'36.1"E; на мелководье у берега старицы, изредка; А.Н. Мялик, 30.06.2019; MSKH, MW. (для *Петриковского р-на* вид указывается впервые).

***Trichophorum alpinum* (L.) Pers. – Пухонос альпийский (III).**

Минская обл., Мядельский р-н, окр. д. Стаховцы, уроч. Чистец; 54°45'22.91"N 26°48'17.47"E; переходное болото с высокой минерализацией, часто; А.В. Кручонок, 27.07.2019.

Витебская обл., Ушачский р-н, окр. д. Загорье, между оз. Лешево и оз. Черствяды; 55°10'57.14"N 28°53'07.53"E; переходное болото, редко; А.В. Кручонок, 30.07.2019.

Витебская обл., Ушачский р-н, окр. д. Волчо; 55°11'28.83"N 28°38'23.35"E; переходное болото, часто; А.В. Кручонок, 30.07.2019.

***Trifolium lupinaster* L. – Клевер люпиновый (хор. дет.).**

Брестская обл., Барановичский р-н, д. Лесная, 1,3 км к ЮЗ; 52°58'09.8"N 25°45'16.8"E; сосняк зеленомошный, редко; А.Н. Мялик, 01.09.2019; MSKH. (в указанном местонахождении вид находится на южной границе ареала).

Всего в результате проделанной работы обнаружено 66 ранее не известных мест произрастания для 46 аборигенных видов сосудистых растений. Многие из них, ввиду своей редкости и уязвимости, включены в Красную книгу Республики Беларусь [10]. Среди них 4 вида (*Hammarbya paludosa* (L.) Kuntze, *Orchis mascula* (L.) L. и др.) имеют II категорию охраны, 6 (*Berula erecta* (Huds.) Coville, *Trapa natans* L. и др.) – III, 13 (*Iris sibirica* L., *Polypodium vulgare* L. и др.) – IV. Всего 9 видов (*Hippuris vulgaris* L., *Sanguisorba officinalis* L. и др.) включены в список дикорастущих растений и грибов, нуждающихся в профилактической охране. Выявленные места произрастания этих видов дополняют известные сведения о частоте их встречаемости, численности и условиях произрастания в Беларуси. Ряд описываемых местонахождений являются крайними точками в ареалах некоторых хорологически детерминированных видов (*Dactylis polygama* Horv., *Trifolium lupinaster* L. и др.), что позволяет уточнить особенности их современного распространения на территории Беларуси. Описанные местонахождения вместе с указаниями некоторых регионально редких видов (*Melampyrum cristatum* Habelitz ex Steud., *Potentilla arenaria* Borkh. и др.) дополняют сведения о составе аборигенной флоры отдельных природных и административных регионов Беларуси, а также некоторых охраняемых природных территорий (заказников местного и республиканского значения). Один гибридогенный вид (*Equisetum* × *moorei* Newman) для флоры Беларуси указывается впервые.

Выводы. Представленные флористические находки дополняют известные сведения о видовом составе аборигенной флоры Беларуси, распространении, частоте встречаемости, численности и условиях произрастания ее отдельных представителей. Полученные результаты могут быть использованы при изучении современного состава аборигенной флоры отдельных природных регионов Беларуси, а также в при реализации природоохранных мероприятий (в том числе и на особо охраняемых природных территориях).

Литература

1. Exkursionsflora für die Gebiete der DDR und der BRD : in 4 bd. / begründet von W. Rothmaler. – Berlin : Volk und Wissen, 1985–1988. – Bd. 3. Atlas der Gefäßpflanzen. – 1988. – 751 s.
2. Маевский, П. Ф. Флора средней полосы европейской части России / П. Ф. Маевский. – 11-е изд. ; редкол.: В. С. Новиков [и др.]. – М. : Тов-во научн. изд. КМК, 2014. – 635 с.

3. Определитель высших растений Беларуси / Т. А. Сауткина [и др.] ; под ред. В. И. Парфёнова. – Минск : Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
4. Определитель высших растений Украины / Н. Д. Доброчаева [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1987. – 548 с.
5. Флора европейской части СССР (Флора Восточной Европы) : в 11 т. / под ред. А. А. Фёдорова, Н. Н. Цвелёва. – Л. (СПб.) : Наука, 2004. – Т. 11. – 536 с.
6. Гербарное дело: справ. рук. / под ред. Д. Бридсон [и др.]. – Кью : Королев. бот. сад, 1995. – 341 с.
7. Скворцов, А. К. Гербарий : пособие по методике и технике / А. К. Скворцов. – М. : Наука, 1977. – 199 с.
8. iNaturalist. A Community for Naturalists [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.inaturalist.org>. – Date of access : 23.10.2020.
9. The Plant List. Version 1.1 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.theplantlist.org>. – Date of access : 21.09.2020.
10. Красная книга Республики Беларусь. Растения : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений / М-во природ. ресурс. и охран. окруж. среды Респ. Беларусь, Нац. акад. наук Беларуси ; гл. редкол.: Л. И. Хоружик (предс.) [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2015. – 445 с.

Центральный ботанический сад
НАН Беларуси

Поступила в редакцию 04.11.2020

УДК 574.587+578.087(282.247.431.2)+595.7(476)

Программное обеспечение PAST – как инструмент анализа данных в фаунистических исследованиях

Г.Г. Сушко

В представленной статье продемонстрированы возможности программного обеспечения PAST 4.04 для анализа фаунистических данных. Для демонстрации использованы материалы собственных исследований ассамблей жужелиц (*Coleoptera*, *Carabidae*) в трех типах сосновых лесов в Белорусском Поозерье. Были показаны методики оценки видового богатства и разнообразия с помощью кривых разрежения, эстиматоров видового богатства и индексов разнообразия, а также методики сравнения видового состава с помощью теста ANOSIM, ординации NMDS и теста SIMPER. Целесообразность данного обзора обусловлена тем, что PAST 4.04 обладает возможностью выполнения большинства основных методов анализа данных фаунистических исследований, а также многих необходимых методов статистической обработки и визуализации данных, не требует написания программного кода и находится в открытом доступе.

Ключевые слова: PAST 4.04, видовое богатство, видовое разнообразие, видовой состав, сравнительный анализ.

The capabilities of the PAST 4.04 software for the analysis of faunal data are presented. For the demonstration, materials from our own studies of assemblies of ground beetles (*Coleoptera*, *Carabidae*) in three types of pine forests in the Belarusian Poozerie were used. Methods for assessing species richness and diversity using rarefaction curves, estimates of species richness and diversity indices were shown, as well as methods for comparing species composition using the ANOSIM test, NMDS ordination and SIMPER test. The expediency of this review is due to the fact that PAST 4.04 has the ability to perform most of the basic methods for analyzing data from faunistic research, as well as many necessary methods of statistical processing and data visualization, does not require writing a program code and is in the public domain.

Keywords: PAST 4.04, species richness, species diversity, species composition, comparative analysis.

Фаунистические исследования, как и любые другие, должны базироваться на четко сформированной доказательной основе. Выводы, построенные на сравнении соотношений в процентах, или полученные только с использованием графических методов в наши дни уже не являются достаточно убедительными. Появление современных компьютерных технологий и разнообразие статистических методов анализа данных позволяет улучшить представление результатов фаунистических исследований и правомерность сформулированных выводов. У многих исследователей, особенно молодых (магистрантов, аспирантов), часто возникают проблемы с выбором метода анализа, но чаще всего основной сложностью является отсутствие возможности использовать дорогостоящие лицензионные пакеты анализа данных. Этот пробел могут восполнить общепризнанное в наши дни бесплатное и общедоступное программное обеспечение, такое как R и Python [1]. Но и здесь возникает проблема, так как для работы требуются навыки программирования и нужно писать программный код для соответствующего типа анализа, что зачастую вызывает у биологов сложности. С другой стороны, и лицензионные пакеты анализа данных не обладают всеми необходимыми инструментами оценки результатов фаунистических исследований, такими как построение кривых накопления видов (*species accumulation curves*), расчет индексов биоразнообразия, эстиматоров видового богатства и др. Большинство необходимых типов анализа данных возможно выполнить с использованием приложения PAST (PAlaeontological STatistics) [2]. PAST – это бесплатное программное обеспечение для анализа данных палеонтологических исследований. Однако оно получило широкое распространение для статистического анализа и в других областях биологических исследований, в том числе для оценки биоразнообразия, сравнения видового состава и графической визуализации результатов [2]. Приложение не имеет поддержки на русском языке, но это компенсируется тем, что оно не требует установки и запускается даже с флэш-накопителя.

В связи с этим, цель данной работы – продемонстрировать возможности приложения PAST для анализа фаунистических данных.

Материалы и методы. Материалом для демонстрации возможностей анализа фаунистических данных в PAST 4.04 послужили результаты собственных исследований ассамблей жужелиц (Coleoptera, Carabidae) в трех биотопах, таких как сосняк зеленомошный (PP – *Pinetum pleuroziosum*), сосняк черничный (PM – *Pinetum myrtillosum*) и сосняк багульниковый (PL – *Pinetum ledosum*). В каждом биотопе материал собирался с использованием почвенных ловушек в шестикратной повторности (получено по 6 выборочных совокупностей). Всего выявлено 24 вида. В исходной таблице данных виды расположены в строках, столбцы, в которых указано число зарегистрированных особей, соответствуют выборкам из каждого типа биотопа. Соответственно таблица включает 24 строки и 18 столбцов (по 6 – на каждый тип биотопа в соответствии с числом выборок).

Результаты и обсуждение. *Методы оценки видового богатства и разнообразия.* Кроме сравнения числа видов в различных местообитаниях для характеристики видового богатства используются такие методы, как разрежение и расчет потенциально возможного числа видов с помощью эстиматоров [3], [4], [5]. Для построения кривых разрежения одного местообитания по выборкам (samples), которые были здесь получены, в PAST предназначена вкладка **Diversity / Sample rarefaction**. Кривая строится с использованием матрицы данных присутствия-отсутствия (1/0) видов в выборках. Можно не преобразовывать матрицу с числом особей видов, так как любое число в ячейке программа рассматривает как присутствие. Таблица должна включать виды в строках (названия видов, как правило, сокращают до 3 букв названия рода и вида), а выборки в столбцах (рисунок 1).

	Habitat	PM	PM	PM	PM	PM	PM
1		19	18	19	0	0	0
2	• Car gla	8	8	7	0	0	0
3	• Car cor	0	0	0	3	0	0
4	• Car hor	63	73	52	2	3	4
5	• Car gra	1	0	0	0	0	0
6	• Car arv	7	12	13	25	33	18
7	• Cyc car	9	15	22	0	1	0
8	• Poe lep	0	0	0	0	0	0
9	• Poe ver	0	0	0	0	3	1
10	• Pte obl	12	17	21	0	0	5
11	• Pte nig	59	80	63	3	1	0
12	• Pte mel	2	0	1	0	0	0
13	• Pte aet	6	6	8	0	0	0
14	• Pte ngt	3	0	0	0	0	0
15	• Pte rha	1	0	0	0	0	0
16	• Pte dil	0	1	0	0	0	0
17	• Cal mic	33	27	25	19	15	0
18	• Cal err	0	0	0	0	0	0
19	• Ama bru	1	0	1	0	0	0
20	• Ago eri	0	0	0	0	0	0
21	• Syn viv	0	0	0	0	3	0
22	• Lor pil	0	0	0	0	1	0

Рисунок 1 – Пример ввода данных для построения кривой разрежения для одного местообитания (*Pinetum myrtillosum* – PM) по нескольким выборкам (скриншот программы PAST)

Разрежение на основе выборок (также известное как кривая накопления видов) применимо только, когда есть несколько выборок (не менее 5), по которым видовое богатство оценивается как функция числа выборок. PAST использует методику анализа «Мао's tau» и рассчитывает стандартное отклонение. На графике стандартные ошибки преобразованы в 95-процентные доверительные интервалы [3]. Используя результаты наших исследований, построим кривые для ассамблей жужелиц трех биотопов. Для сосняка зеленомошного кривая достаточно плавная, и она приближается к асимтоте (рисунок 2а). Это говорит о том, что видовое богатство может быть выше, чем выявленное нами. Кривая для сосняка черничного имеет вид асимтоты, и она выходит на плато, что указывает на то, что выявленное число видов практически соответствует потенциально возможному в данном местообитании (рисунок 2б). В сосняке багульничном кривая наиболее сглажена, что свидетельствует о наличии большего числа видов, чем здесь обнаружено (рисунок 2в).

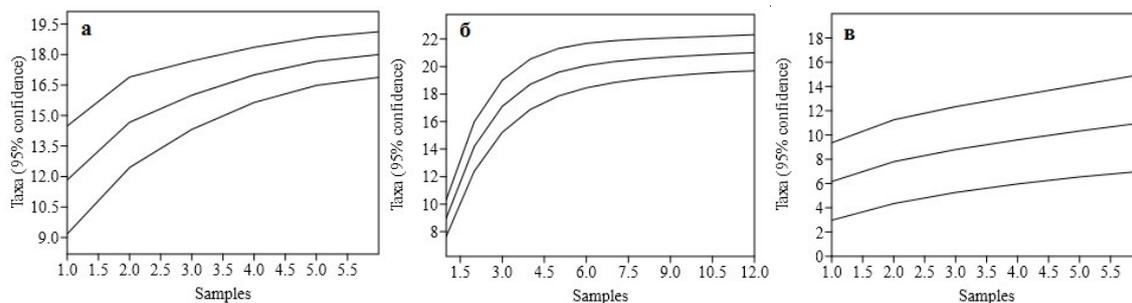


Рисунок 2 – Кривые разрежения для ассамблей жуужелиц сосняка зеленомошного (*Pinetum pleuroziosum*) (а), сосняка черничного (*Pinetum myrtillosum*) (б), сосняка багульникового (*Pinetum ledosum*) (в); Таха – число видов, Samples – число выборок

В PAST предусмотрена и другая методика оценки видового богатства – сравнение с помощью кривых разрежения ассамблей видов нескольких местообитаний по числу особей (или других количественных данных). Для этого предназначен модуль **Individual raefaction** во вкладке **Diversity**. Этот модуль предполагает, как и в предыдущем примере, использование таблицы данных о численности, но уже в нескольких местообитаниях. Методика позволяет оценить, сколько видов вы ожидаете обнаружить в выборках даже с не высоким общим количеством особей, сравнить количество видов в выборках разного размера (как правило, мы имеем дело с разным числом видов в выборках из одного местообитания). Используя анализ разрежения для большой выборки, вы можете предположить количество ожидаемых видов для любой меньшей выборки.

Полученный нами график (рисунок 3) содержит информацию обо всех выборках и позволяет сравнивать их размеры, а также видовое богатство.

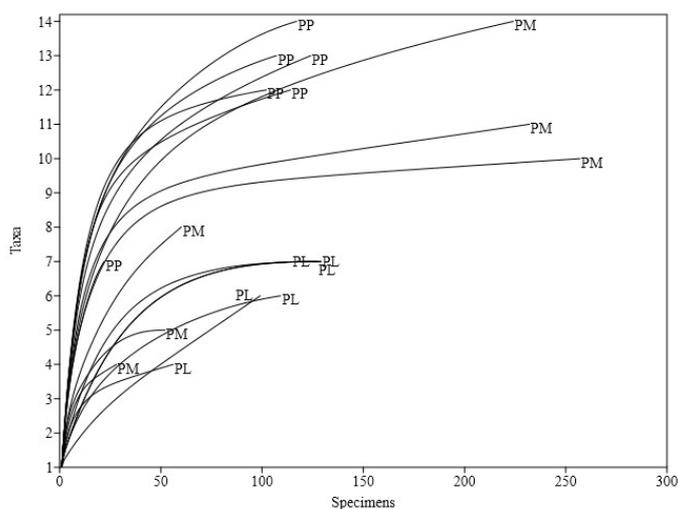


Рисунок 3 – Кривые разрежения для ассамблей жуужелиц нескольких местообитаний (PP – *Pinetum pleuroziosum*, PM – *Pinetum myrtillosum* и PL – *Pinetum ledosum*); Таха – число видов, Specimen – число особей

На рисунке 3 можно увидеть, что в целом число видов в отдельных выборках выше в сосняке зеленомошном, а наименьшее – в сосняке багульниковом. Как и в предыдущем примере, наиболее близкое видовое богатство к потенциально возможному наблюдается в сосняке черничном. Полученные кривые обладают высокой информативностью и в зависимости от целей исследования дают возможность для всестороннего сравнения выборок. Кроме того, модуль позволяет продемонстрировать каждую выборку по отдельности, в том числе и с указанием доверительного интервала (рисунок 4).

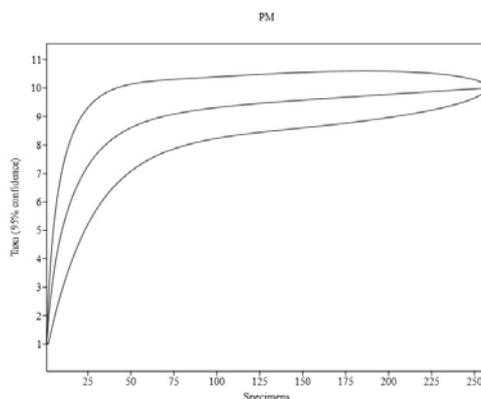


Рисунок 4 – Кривая разрежения для ассамблеи жужелиц сосняка черничного (PM – *Pinetum myrtillosum*) для одной из выборок; Taxa – число видов, Specimen – число особей

Другой способ оценки видового богатства – сравнение полученного в результате исследований числа видов с потенциально возможным видовым богатством установленным с помощью так называемых эстиматоров. В PAST заложены алгоритмы вычисления 4 эстиматоров: Chao 2, jackknife 1, jackknife 2 и bootstrap. Для их вычисления предназначен модуль **Quadrat richness** во вкладке **Diversity**. Анализ выполняется с применением таблицы данных присутствия-отсутствия (1/0) видов в выборках [6]. Можно не преобразовывать матрицу с числом особей видов, так как любое число в ячейке программа рассматривает как присутствие. Таблица должна включать виды в строках, а выборки в столбцах (рисунок 1). Продемонстрируем расчеты на примере выборок полученных в сосняке черничном (рисунок 5).

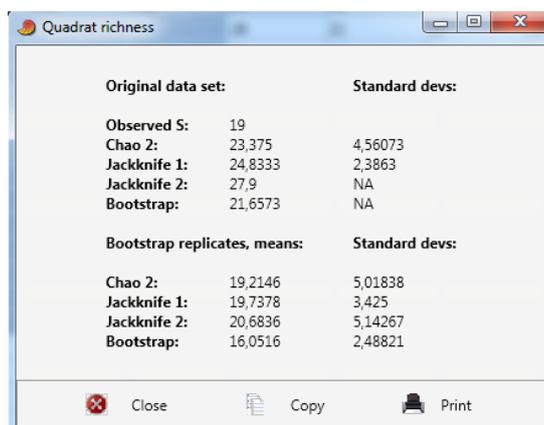


Рисунок 5 – Панель результатов расчетов эстиматоров видового богатства для одного местообитания (PM – *Pinetum myrtillosum*) по нескольким выборкам (скриншот программы PAST)

Результаты расчетов эстиматоров видового богатства разделены на две панели. Сначала по заданному набору выборок вычисляются значения эстиматоров и их стандартные отклонения (только для Chao2 и Jackknife1). Затем эстиматоры вычисляются повторно с помощью 1000 созданных путем случайных перестановок выборок (методика bootstrapping). На второй панели показаны их средние значения и стандартные отклонения (рисунок 5).

В нашем примере общее число видов (Sobs) по всем 6 выборкам составило 19. Тогда как результаты на второй панели показывают, что предполагаемое число видов по значениям разных эстиматоров может быть от 16 до 20 видов в данном местообитании с относительно невысокими стандартными отклонениями. Непараметрические эстиматоры демонстрируют, как правило, завышенные результаты. Считается, что Chao 2 и Jackknife 2 дают оценки наиболее приближенные к реальности [6], [7]. Следовательно, исходя из значений Chao 2 и Jackknife 2, мы приложили достаточные выборочные усилия при сборе материала, и выявленное нами видовое богатство жужелиц отражает потенциально возможное в данном биотопе.

Для оценки видового разнообразия можно использовать ряд различных индексов с помощью модуля **Diversity indices** во вкладке **Diversity**.

Методы оценки видового состава. Следующим этапом анализа фаунистических данных, как правило, является сравнение видового состава. Различия видового состава ассамблей жужелиц 3 местообитаний проанализируем с использованием теста ANOSIM (Analysis Of Similarities). ANOSIM проверяет значимые различия между двумя или более группами на основе определенной меры расстояния. В экологических исследованиях в качестве такой меры используют расстояние Брея-Кертиса. В ходе анализа формируется итоговая статистическая мера R-тест. Если $R = 1$, сообщества очень сильно различаются, если $R = 0$ – полностью сходны. Значения R больше 0,75 принято интерпретировать как хороший уровень различий, R больше 0,5 – как наличие различий, R меньше 0,25 – как едва различимые различия [8]. Также в PAST для сравнения видового состава можно применить и PERMANOVA (Permutational multivariate analysis of variance). Анализ PERMANOVA можно выполнить с использованием вкладки **Multivariate / Tests / one-way PERMANOVA**.

Для выполнения теста ANOSIM использована вкладка **Multivariate / Tests / one-way ANOSIM**. В таблице данных для анализа в столбцах указано число особей разных видов, тогда как в строках – названия выборок из соответствующих биотопов (рисунок 6). Нужно обязательно обозначить тип биотопа как группирующую переменную в атрибутах столбцов в окне ввода данных программы. Перед анализом нужно обратить внимание на выбор меры расстояния или индекса сходства (Similarity index). Изначально программа предлагает меру расстояния Эвклида, которая не всегда подходит для экологических данных. Поэтому нужно выбрать меру расстояния Брея-Кертиса.

Site ID	Habitat	Car vio	Car gla	Car cor	Car hor	Car gra	Car arv	Cys car
1	PM	19	8	0	63	1	7	9
2	PM	18	8	0	73	0	12	15
3	PM	19	7	0	52	0	13	22
4	PM	0	0	3	2	0	25	0
5	PM	0	0	0	3	0	33	1
6	PM	0	0	0	4	0	18	0
7	PP	11	0	0	6	0	17	2
8	PP	11	0	0	13	0	15	1
9	PP	18	0	0	6	0	11	2
10	PP	19	1	0	7	0	18	2
11	PP	18	0	0	6	0	8	1
12	PP	0	1	2	8	0	2	0
13	PL	0	2	0	0	3	0	0
14	PL	0	0	0	0	4	0	0
15	PL	0	0	0	1	0	0	1
16	PL	0	0	0	0	0	0	0
17	PL	0	0	0	0	2	0	0
18	PL	0	2	0	0	3	0	0
19								
20								
21								
22								

Рисунок 6 – Пример ввода данных для выполнения сравнительного анализа видового состава жужелиц нескольких местообитаний по нескольким выборкам в каждом (скриншот программы PAST)

В нашем примере $R = 0,818$, $p = 0,0001$, что свидетельствует о высоких достоверных различиях видовой состав жужелиц трех биотопов. Для повышения уровня достоверности результатов стандартный p -уровень, который приводится по умолчанию, можно корректировать с помощью поправки Бонферрони, что сделано в рассматриваемом примере. Среди предложенных программой поправок можно также использовать еще одну – sequential Bonferroni, которая является наиболее мощной, но может давать заниженные результаты [4].

Для визуализации различий выборок PAST содержит широкий набор инструментов от кластерного анализа до различных методов ординации (PCA, PCoA, CA, DCA, NMDS и др.), которые можно реализовать с помощью вкладки вкладка **Multivariate**. Однако многие из этих методов могут иметь ограничения для данных фаунистических исследований [9]. Наиболее часто используемым методом является NMDS (Non-metric multidimensional scaling), так как не требует нормального распределения данных и позволяет выбрать из множества различных мер расстояния подходящее.

Для демонстрации данного анализа используем таблицу данных ту же, что и для предыдущего примера, но с некоторыми изменениями. Виды, представленные менее, чем 3 особями в выборках, должны быть исключены из анализа для снижения так называемого «шума». Поскольку многие виды представлены в выборках 1 экземпляром, перед анализом нужно выполнить преобразование данных (логарифмирование, $\log_{10}(x + 1)$) [7], [9]. Для лучшей визуализации можно обозначить выборки одного биотопа определенным символом используя **Row attributes / Symbol**. В нашем примере РМ обозначен точкой, РР – плюсом, РЛ – квадратом.

Для выполнения неметрического многомерного шкалирования использована вкладка **Multivariate / Ordination / Non-metric MDS**. На полученной ординационной диаграмме видна отчетливая дифференциация биотопов по обилию коллектированных видов. Сходством характеризуются биотопы РМ и РР. Биотоп РЛ обладает наибольшими отличиями от остальных (рисунок 7). Это демонстрирует степень различия (градиент) экологических условий анализируемых местообитаний. Концентрация символов, соответствующих выборкам, вокруг определенных биотопов указывает на то, что данные выборки получены из различных генеральных совокупностей.

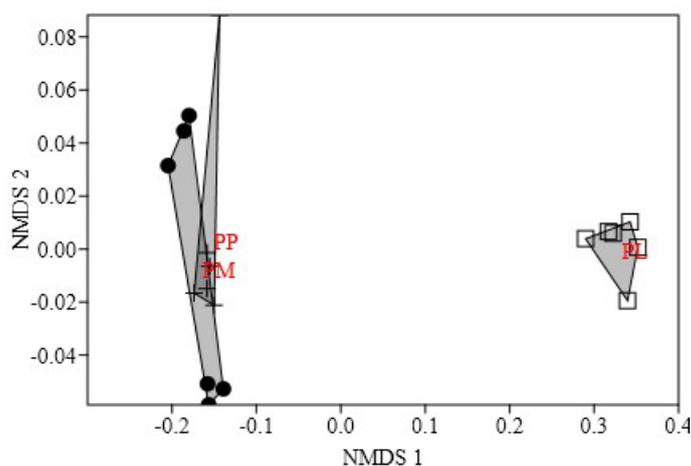


Рисунок 7 – Диаграмма NMDS ординации для ассамблей жуужелиц трех местообитаний (PP – *Pinetum pleuroziosum*, РМ – *Pinetum myrtillosum* и РЛ – *Pinetum ledosum*)

Для проверки качества результатов анализа можно построить диаграмму Шепарда с помощью вкладки **Shepard plot** [10].

Завершающим этапом анализа сходства или различия видового состава нескольких биотопов может быть выявление индикаторных видов или видов, которые способствуют наибольшему различию. В PAST для данных целей предусмотрен тест SIMPER (Similarity of Percentage). SIMPER тест, основанный на сходстве в процентах, является простым методом оценки вклада определенных видов в наблюдаемые различия между группами выборок. Как правило, различия между выборками в целом предварительно оцениваются с помощью ANOSIM. Для SIMPER чаще всего используется мера сходства Брея-Кертиса, но также можно выбирать и другие меры при необходимости. Если анализируется более двух групп, вы можете сравнить любые две группы (попарно), или объединить все выборки для выполнения общего анализа (overall multi-group SIMPER). Общее среднее различие (overall average dissimilarity) рассчитывается с использованием всех видов, в то время как различие, характерное для конкретного вида, вычисляется по отдельности [8].

Таблица данных для теста SIMPER сформирована по такому же принципу, как и в предыдущем примере. Для выполнения анализа используем вкладку **Multivariate / Tests / SIMPER**. В таблице результатов SIMPER теста, по данным первых трех столбцов (Average dissimilarity – среднее различие, Contribution % – вклад в различия в %, Cumulative % – накопленные различия в %), можно выявить виды, которые вносят наибольший вклад в гетерогенность видового состава анализируемых биотопов (Average dissimilarity).

Заключение. Таким образом, программное обеспечение PAST 4.04 обладает необходимыми возможностями для анализа фаунистических данных. В их числе методики оценки видового богатства и разнообразия с помощью различных типов кривых разрежения, эстиматоров видового богатства и индексов разнообразия. Кроме того, PAST 4.04 содержит методы многомерного анализа данных, такие как различные типы ординации и непараметрических тестов, которые позволяют выявить достоверные различия видового состава и визуализировать их.

Литература

1. Кабаков, Р. И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R. / Р. И. Кабаков – М. : ДМК Пресс, 2014. – 588 с.
2. 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.
3. Colwell, R. K. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves / R. K. Colwell, C. X. Mao, J. Chang // *Ecology*. – 2004. – № 85. – P. 2717–2727.
4. Legendre, P. *Numerical Ecology* / P. Legendre, L. Legendre. – 2nd ed. – Amsterdam : Elsevier, 1998. – 854 p.
5. Colwell, R. K. Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages / R. K. Colwell, A. Chao, N. J. Gotelli, S.-L. Lin, C. X. Mao, R. L. Chazdon, J. T. Longino // *Journal of Plant Ecology*. – 2012. – № 5. – P. 3–21.
6. Colwell, R. K. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation / R. K. Colwell, J. A. Coddington // *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series B*. – 1994. – № 345. – P. 101–118.
7. McCune, B. *Analysis of ecological communities* / B. McCune, J. B. Grace. – Gleneden Beach : MjMSoftware Design, 2002. – 300 p.
8. Anderson, M. J. PERMANOVA, ANOSIM, and the Mantel test in the face of heterogeneous dispersions: what null hypothesis are you testing? / M. J. Anderson, D. C. Walsh // *Ecological monographs*. – 2013. – Vol. 83, № 4. – P. 557–574.
9. Сушко, Г. Г. Методы многомерного анализа данных в синэкологии насекомых / Г. Г. Сушко // *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. – 2020. – № 1. – С. 38–45.
10. Borcard, D. *Numerical Ecology with R*. / D. Borcard, F. Gillet, P. Legendre. – Wien : Springer Nature, 2018. – 306 p.

УДК:57.083.1:431.427.2 (476.2-37 Хойники)

Основные физиологические группы микроорганизмов торфяной почвы зоны отчуждения ЧАЭС

Е.А. ТАНКЕВИЧ¹, И.И. КОНЦЕВАЯ², А.Н. НИКИТИН¹

В работе исследуется численность основных физиологических групп микроорганизмов в составе торфяной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Установлено, что торфяная почва пробного участка I характеризуется большей степенью обогащенности почвы микроорганизмами. Это связано, во-первых, с повышенным содержанием воды (коэффициент влажности – 57,41 %) в образце торфа пробного участка I, что способствует быстрому росту микробонаселения почвы, во-вторых, определяется большим количеством корней растений. Наиболее чувствительными к ионизирующему излучению являются эукариотические микроорганизмы – микромицеты, что наблюдалось в обоих опытных вариантах.

Ключевые слова: почвенные ассоциации микроорганизмов, радиоактивное загрязнение, зона отчуждения Чернобыльской АЭС.

The quantitative analysis of main physiological groups of soil microorganisms in the peat soil from exclusion zone of the Chernobyl NPP is presented in the article. It was found that the peat soil of the test site I is characterized by a higher degree of soil enrichment with microorganisms. This is due, firstly, to the increased water content (humidity coefficient – 57,41 %) in the sample of peat of the test site I, which contributes to the rapid growth of soil microbopulation, and secondly, is determined by a large number of plant roots. The most sensitive to ionizing radiation are eukaryotic microorganisms-micromycetes, which was observed in both experimental variants.

Keywords: associations of soil microorganism, radioactive contamination, exclusion zone of Chernobyl NPP.

Введение. Основными источниками радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова являются глобальные радиоактивные выпадения из атмосферы долгоживущих радионуклидов после ядерных испытаний, а также выбросы техногенных радионуклидов, связанные с работой промышленных предприятий, аварий на АЭС. Загрязнение системы «почва-растение» различными химическими веществами, а главным образом твердыми, жидкими и газообразными отходами промышленности, продуктами топлива и т. д. приводит к изменению химического состава почв.

Почва является средой обитания микроорганизмов. Количественный и качественный состав микрофлоры различных почв значительно колеблется в зависимости от химического состава почвы, ее физических свойств, реакции, влагоемкости, степени аэрации. Существенно влияют также климатические условия, время года, способы сельскохозяйственной обработки почвы, характер растительного покрова и многие другие факторы [1]. Микрофлора играет важную роль в преобразовании физико-химического состояния радионуклидов в почве. В зависимости от типа почвы, а, соответственно, и населяющего его микробоценоза, эти процессы могут как ускоряться, так и тормозиться. Данный вопрос требует комплексного подхода, с организацией долгосрочного мониторинга. Тем не менее, в этом направлении получены данные. В частности, был изучен качественный и количественный состав бактерий в различных экосистемах зоны отчуждения ЧАЭС. Было установлено, что селективный стресс длительного действия ядерной радиации на почвенные бактерии в зоне ЧАЭС проявился как изменение их качественного и количественного состава [2].

Цель работы: выявить количественный состав основных физиологических групп микроорганизмов в торфяной почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

Материал и методы исследований. Объектом исследования явилась загрязненная радионуклидами торфяная почва. Отбор почвенных образцов проводили в июле 2020 г. согласно стандартным методикам [3] на двух площадках: 1) бывшего населенного пункта Масаны (М-3) (Гомельская область, Беларусь, Полесский государственный радиационный экологиче-

ский заповедник) и 2) урочище Майдан (Ма-1), отличающихся по степени загрязненности радионуклидами. Географические координаты и радиационная характеристика пробных участков представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Географические координаты и радиационная характеристика пробных участков

Номер образца почвы (шифр пробной площади)	Координаты		МЭД, мкЗв·ч ⁻¹	
	Широта	Долгота	На поверхности	На расстоянии 1 м от поверхности
I (М-3)	51° 30' 23,9''	30° 01' 22,7''	9,60 ± 0,96	7,50 ± 0,90
II (Ма-1)	51°30'47,5"	30°01'10,3"	1,90 ± 0,29	1,30 ± 0,20

Фитоценоз пробной площадки М-3 (рисунок 1, а) – сосняк мшистый, почва торфяная. Древостой составляет сосна обыкновенная высотой 20 м, возраст 70 лет. В подростово-подлесочном ярусе довольно часто встречается дуб, крушина встречается реже, рябина – единично. Подрост сосны отсутствует. Проективное покрытие живого напочвенного покрова составляет 60 % площади пробного участка. Доминирующий вид – мох Шребера (*Pleurosium schreberi*). Довольно часто встречается мох Дикранум многоножковый (*Dicranum polysetum*).

Фитоценоз пробной площадки Ма-1 (рисунок 1, б) – черноольшаник крапивный с примесью дуба, крушины. Проективное покрытие живого напочвенного покрова составляет 90 % площади пробного участка. Почва торфянисто-подзолистая, глеевая.



а



б

Рисунок 1 – Общий вид пробных площадей: а – М-3, б – Ма-1

Агрохимические показатели почв исследуемых участков представлены в таблице 2. Определение показателей в почвенных образцах осуществляли по ГОСТам [4]–[10].

Как видно из таблицы 2, по степени кислотности исследуемые почвы относятся к сильнонокислым (рН в КСl равна 3,5–3,89). Необходимо отметить, что почвенная кислотность неблагоприятна для развития растений и микроорганизмов, плодородия почвы, что обусловлено недостатком кальция, изменением доступности для растений элементов питания, ухудшением физических свойств почвы [11].

Таблица 2 – Агрохимические показатели почв

Агрохимические показатели почвы, единицы измерения	Номер участка	
	I	II
рН (в КСl), ед.	3,89	3,5
Са (обм), ммоль/100 г	10	12,5
Са (обм), млн ⁻¹ (мг/кг)	2004	2505
Mg (обм, подв.), ммоль/100 г	4,38	5,00
Mg (обм, подв.), млн ⁻¹ (мг/кг)	532	608
P ₂ O ₅ (подв), млн ⁻¹ (мг/кг)	183	175
Зольность, %	48,73	32,42
S, сумма поглощённых оснований, ммоль/100 г	13,6	14,8
Hг, гидролитическая кислотность, ммоль/100 г	45,9	32,8
T, ёмкость поглощения, ммоль/100 г	59,5	47,6
V, степень насыщенности почв основаниями, %	22,86	31,09

Образцы почвы пробных участков по содержанию обменного кальция относятся к группе с низким (участок I) и средним (участок II) содержанием. Наличие обменного магния в почвенных образцах I и II (532 мг/кг и 608 мг/кг, соответственно) является избыточным. Почвы участка I и II имеют высокое содержание подвижных форм фосфора (183 мг/кг и 175 мг/кг). По степени зольности почвы обоих участков относятся к высокозольным (48,73 % и 32,42 % соответственно). По сумме поглощенных оснований оба образца почвы характеризуются средним уровнем (13,6–14,8 ммоль/100 г).

Коэффициент влажности торфяной почвы пробного участка I равен 57,41 %, торфяной почвы пробного участка II – 33,2 %.

Измерение экспозиционной дозы в месте отбора образцов выполняли с помощью дозиметра МКС-АТ1125. В отобранных образцах почвы определяли содержание изотопов ^{137}Cs методом гамма-спектрометрии с использованием детектора из высокочистого германия с расширенным энергетическим диапазоном в составе γ -спектрометрического комплекса Canberra.

Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [3], [12]. Использовали чашечный метод Коха, с помощью которого определяли численность аммонифицирующих, амилолитических, олигонитрофильных, олигокарбофильных, автохтонных микроорганизмов на селективных питательных средах: мясо-пептонном (МПА), крахмало-аммиачном (КАА), среда Эшби, голодном (ГА), нитритном (НА) агарах, соответственно. Все посеы проводили в трехкратной повторности. Численность микроорганизмов определяли в колониеобразующих единицах (КОЕ), пересчитывали на 1 г абсолютно сухой почвы. Расчет эколого-физиологических индексов и коэффициентов выполняли по [13].

Полученные данные обработаны статистически с использованием пакета прикладного программного обеспечения «Statsoft (USA) Statistica v.7.0».

Результаты исследований и их обсуждение. Исследуемые образцы торфяной почвы характеризуются различной плотностью загрязнения изотопами цезия-137. Как видно из рисунка 2, наибольшая удельная активность торфяной почвы по цезию-137 приходилась на пробный участок I – $68568,3 \pm 447,6$ Бк/кг (бывший населенный пункт Масаны).

В тоже время содержание данных изотопов в почвенных образцах пробной площадки II (урочище Майдан) было ниже в 9,5 раз, что составляло по удельной активности почвы по цезию-137 $7341,3 \pm 445,6$ Бк/кг.

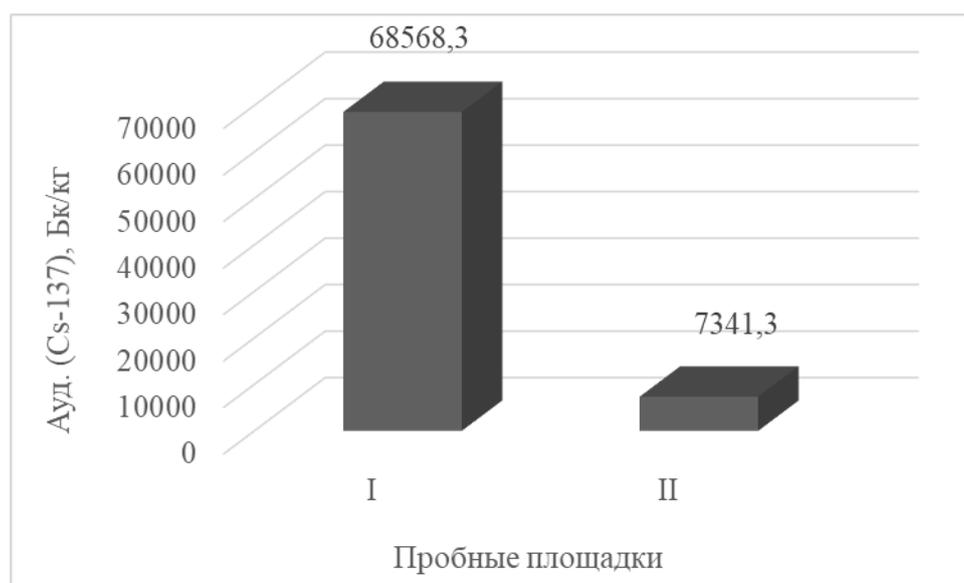


Рисунок 2 – Удельная активность Cs^{137} в почвенных образцах

В результате исследования численности основных физиологических групп почвенных микроорганизмов (рисунок 3) было установлено, что образец торфяной почвы участка I со-

держит большее количество микроорганизмов по всем исследуемым физиологическим группам микроорганизмов по сравнению с почвенным образцом пробного участка II. В образце II наибольшая численность характерна для аммонифицирующих микроорганизмов, далее в ряду по мере уменьшения представлены группы: споровые аммонификаторы, целлюлозоразрушающие аэробные, амилалитические, олигонитрофильные, олигокарбофильные, автохтонные, олиготрофы, фосфатмобилизующие, микромицеты.

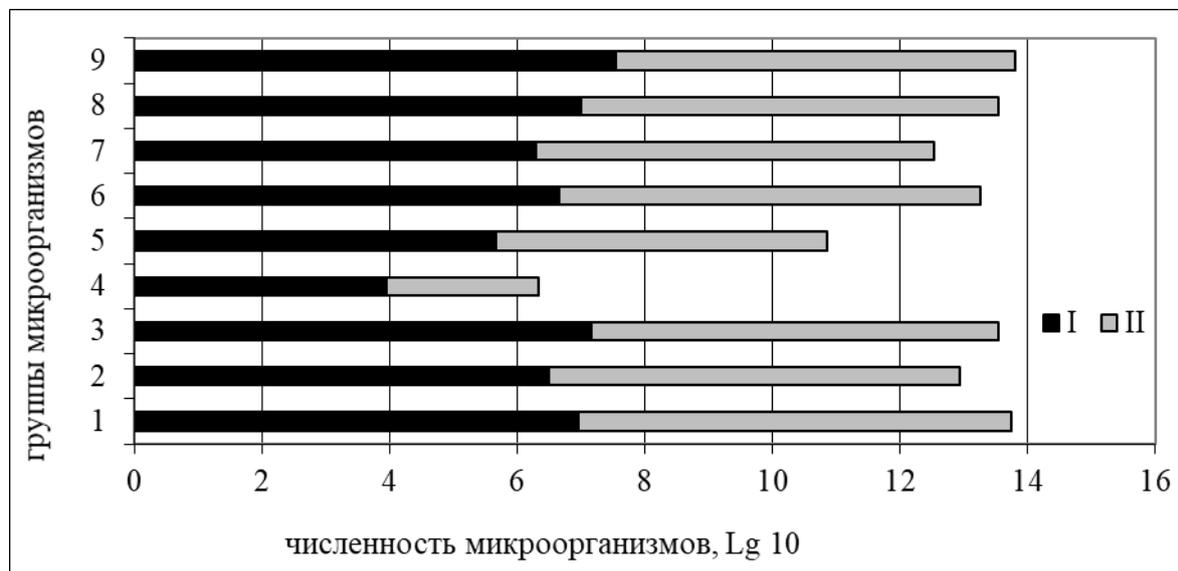


Рисунок 3 – Численность основных физиологических групп почвенных микроорганизмов
Группы микроорганизмов: 1 – аммонифицирующие, 2 – амилалитические, 3 – олигонитрофильные, 4 – микромицеты, 5 – фосфатмобилизующие, 6 – споровые аммонификаторы, 7 – автохтонные, олиготрофы, 8 – целлюлозоразрушающие аэробные, 9 – олигокарбофильные; I, II – номер участка

Следует отметить высокую численность олигокарбофильной группы микроорганизмов для торфяной почвы образца I, что составляло $35,5 \times 10^6$ КОЕ/г почвы.

Данная подгруппа олиготрофов обладает высокой окислительно-восстановительной ферментативной активностью и поэтому по биохимической принадлежности наиболее приближена к автохтонной части микробоценоза почвы. В условиях минимального количества или полного отсутствия доступного углерода в почвенном растворе олигокарбофилы начинают трансформировать свободные и новообразованные фракции гумуса и, тем самым, участвовать в преобразовании специфического органического вещества почвы и изменять ее гумусовой режим [13]. Численность микроорганизмов олигокарбофильной группы в торфяной почве участка I выше в 19,7 раз, чем в почве опытного участка II, возможно, это связано с более высокими уровнями pH и влажности почвы, либо может свидетельствовать о замедлении процессов деструкции органического вещества и переходом изучаемого биоценоза в более устойчивое состояние.

В литературе имеются сведения о том, что наиболее чувствительными к ионизирующему излучению являются микроскопические грибы [2], [14]. При этом авторы акцентировали внимание на тот факт, что численность микромицетов не зависит напрямую от уровня радиоактивного загрязнения почвы, хотя негативные последствия на микробоценоз отмечаются. В настоящем исследовании на торфяной почве, которая характеризуется большей плотностью загрязнения изотопами цезия-137 (образец I), наблюдали противоположные результаты: отмечено увеличение численности КОЕ грибных зачатков на 1 г почвы в 60 раз по сравнению с образцом почвы II. Можно предположить, что такой результат связан в первую очередь с меньшей, почти в два раза, влажностью почвы (коэффициент влажности составил 33,2 %) и более низким содержанием подвижных форм фосфора в образце торфяной почвы пробного участка II.

Для установления особенностей взаимоотношений отдельных групп микроорганизмов, участвующих в общем процессе разложения органического вещества почвы, был произведен расчет эколого-трофических индексов и коэффициентов почвы (рисунок 4).

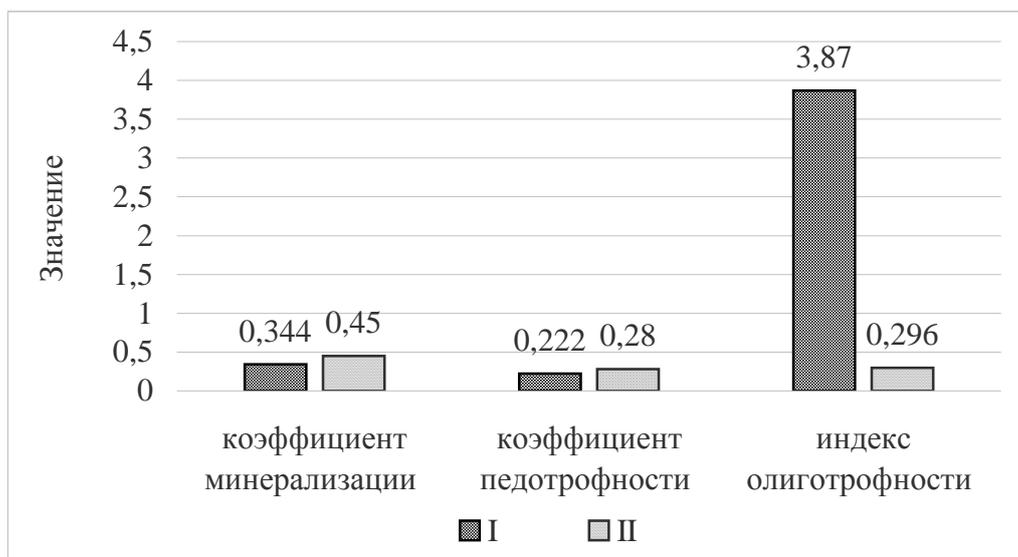


Рисунок 4 – Эколого-трофические индексы органического вещества почвы

Параметры коэффициента минерализации и коэффициента педотрофности несколько ниже в образце торфяной почвы пробного участка I по сравнению с почвой пробного участка II. Тем не менее, в обоих образцах преобладают, согласно установленным значениям коэффициента минерализации и иммобилизации Мишустина, процессы минерализации, что и было ожидаемо для июля месяца, когда проводили отбор почвы.

Значения коэффициента педотрофности указывают, что изучаемые фитоценозы находятся в состоянии дисбаланса и слабо устойчивы к внешним стрессовым факторам. Очевидно, из-за более высокой плотности загрязнения почвы изотопами цезия-137 микробное сообщество образца торфяной почвы пробного участка I сформировало фитоценоз, который характеризуется уменьшением содержания в почве подвижных органических веществ по сравнению с фитоценозом пробного участка II.

Индекс олиготрофности фитоценоза участка II в 13 раз ниже по сравнению с фитоценозом I. Данный индекс показывает активность олиготрофной части микробоценоза почвы [13]. Такой результат для фитоценоза II в том числе подтверждается не только соотношением автохтонных олигокарбофильных бактерий к аммонифицирующим, но и содержанием микробных зачатков микромицетов, которые являются одними из главных деструкторов органического вещества.

Выводы. В ходе исследования установлено, что торфяная почва пробного участка I по сравнению с почвенным образцом пробного участка II характеризуется большей степенью обогащенности почвы микроорганизмами по всем основным физиологическим группам. Это связано, во-первых, с большим содержанием воды в торфяной почве I (57,41 %), что способствует быстрому росту микробонаселения почвы, во-вторых, оно определяется большим количеством корней растений.

Отмечена высокая численность олигокарбофильной группы микроорганизмов для торфяной почвы образца I, что составляло $35,5 \times 10^6$ КОЕ/г почвы.

В свою очередь, выявленная плотность загрязнения радионуклидами торфяной почвы в меньшей степени оказывает влияние на количественное содержание в ней большинства изученных физиологических групп микроорганизмов. Наиболее чувствительными к ионизирующему излучению являются эукариотические микроорганизмы – микромицеты, что наблюдалось в обоих опытных вариантах.

Литература

1. Мишустин, Е. Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия / Е. Н. Мишустин. – М. : Агропромиздат, 1972. – 342 с.
2. Романовская, В. А. Чувствительность к стрессовым факторам почвенных бактерий, изолированных из зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / В. А. Романовская, П. В. Рокитко, Ю. Р. Малащенко, Н. А. Чорная // Микробиология. – 1999. – Т. 68, № 4. – С. 534–539.

3. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв / под ред. Ю. М. Возняковской. – Л. : ВНИИСХМ, 1987. – 47 с.
4. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО : ГОСТ 26483-85 : введ. 01.07.1986. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 6 с.
5. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26212-91 : введ. 01.07.1993. – М. : Издательство стандартов, 1993. – 7 с.
6. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена : ГОСТ 27821-88 : введ. 01.01.1990. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 7 с.
7. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО : ГОСТ 26487-85 : введ. 01.07.1986. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 14 с.
8. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26207-91 : введ. 01.07.1993. – М. : Издательство стандартов, 1993. – 13 с.
9. Определение нитратов ионометрическим методом : ГОСТ 26951-86 : введ. 30.06.1986. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 7 с.
10. Методы определения органического вещества : ГОСТ 26213-91. – Взамен ГОСТ 26213-84 ; введ. 01.07.1993. – М. : Издательство стандартов, 1993. – 9 с.
11. Марчик, Т. П. Почвоведение с основами растениеводства : учеб. пособие / Т. П. Марчик, А. Л. Ефремов. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 248 с.
12. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.
13. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества : науч. метод. пособие / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.
14. Панахова, А. А. Влияние гамма-излучения на микробиологические свойства почвы (на примере серо-бурой почвы Абшерона) / А. А. Панахова // Bakı universitetinin xəbərləri : Təbiət elmləri seriyası. – 2009. – № 4. – С. 92–96.

¹Институт радиобиологии
НАН Беларуси

²Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 12.04.2021

УДК: 630*17:630*915

Современная дендрофлора отселенных деревень зоны отчуждения Чернобыльской АЭС Беларуси

А.В. УГЛЯНЕЦ, Д.К. ГАРБАРУК, Л.М. ТУРЧИН

Исследована современная дендрофлора отселенных деревень белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Установлено произрастание в них 48 видов и 2 разновидностей деревьев, 61 вида кустарников и 2 видов лиан. Дается краткий анализ дендрофлоры. Определены влияющие на ее формирование факторы. Приведена оценка распространения отдельных видов. В отселенных деревнях выявлено произрастание 11 чужеродных вредоносных видов. Из них 5 представляют серьезную угрозу для растительных сообществ зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: зона отчуждения Чернобыльской АЭС, отселенные деревни, дендрофлора.

The modern dendroflora of resettled villages of the Belarusian sector of the exclusion zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant has been studied. The growth of 48 species and 2 subspecies of trees, 61 species of shrubs and 2 species of lianas was established. A brief analysis of dendroflora is given. The factors influencing its formation are determined. The assessment of the distribution of certain species is given. In the resettled villages, the growth of 11 alien harmful species was revealed. Five of them pose a serious threat to plant communities in the exclusion zone of the Chernobyl NPP.

Keywords: exclusion zone of the Chernobyl NPP, evicted villages, dendroflora.

Введение. С территории белорусского сектора зоны эвакуации, или отчуждения (ЗО) Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), в границах которой с 1988 г. функционирует Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник), в 1986–1993 гг. было выселено 95 деревень [1]. Большая часть их расположена на песчаных, реже – на супесчаных, небольшое количество – на лессовидных отложениях Хойникской водно-ледниковой равнины (северо-восток ЗО), единичные деревни – на участках моренных отложений водно-ледниковых равнин Житомирского Полесья (юго-запад ЗО) [2]–[4].

Все отселенные деревни ЗО ЧАЭС в свое время были построены на месте лесов. На плодородных почвах леса были сведены полностью, а деревни стали «полевыми». После эвакуации населения с радиоактивно загрязненных земель в бывших населенных пунктах (б.н.п.) начала восстанавливаться географически и исторически обусловленная лесная растительность. Основой для образования лесов являлась антропофитная дендрофлора покинутых селений. Часть семенного материала поступала с прилегающих лесов, придорожных посадок и иных насаждений сопредельных территорий. По мере формирования лесных насаждений дендрофлора б.н.п. претерпела определенные изменения.

В ЗО ЧАЭС на протяжении 1992–2020 гг. велись флористические исследования, охватившие большую часть б.н.п. В 2002 г. был опубликован первый список флоры сосудистых растений [5], который периодически дополнялся и изменялся [6]–[8]. Все выявленные виды подтверждены гербарными сборами, которые хранятся в коллекции заповедника. Целевые исследования дендрофлоры б.н.п. в ЗО ЧАЭС не проводились.

Объекты и методика исследований. Изучение видового состава дендрофлоры б.н.п. проводили в 2019–2020 гг. в 6 модельных отселенных деревнях (Воротец, Вязок, Дуброва, Дроньки, Ломыш, Чикаловичи), находящихся в разных частях белорусского сектора ЗО ЧАЭС (рисунок), на почвах различного гранулометрического состава в лесной и безлесной местности, а также методом анализа гербарного и литературного материала.

Б.н.п. Ломыш расположен на крайнем северо-западе ЗО на древнеаллювиальных и эоловых песках, почвы связно- и рыхлопесчаные, типы условий местопроизрастания (ТУМ) А₂, А₁, А₂В₂; б.н.п. Дроньки – в центре ЗО на древнеаллювиальных песках, почвы рыхло- и связно-песчаные, в понижении супесчаные оглеенные, ТУМ А₂, А₂В₂, С₃; б.н.п. Чикаловичи – на крайнем юго-востоке ЗО на аллювиальных и древнеаллювиальных отложениях, почвы связно-песчаные, супесчаные, ТУМ А₂, А₂В₂, В₂С₂, С₂₋₃; б.н.п. Воротец и Вязок – на северо-востоке

ЗО на ледниковых образованиях водно-ледниковой равнины, почвы лесовидные супесчаные с прослойками и слоями суглинка, ТУМ Д₂, Д₂₋₃; б.н.п. Дуброва – на юго-западе ЗО на участке моренной равнины, почвы песчаные и супесчаные с прослойками и слоями моренных суглинков и глин, ТУМ Д₂, Д₂₋₃, С₂₋₃. Воротец и Вязок – «полевые» деревни, остальные – «лесные».



Рисунок – Схема расположения объектов исследования

В модельных б.н.п. обследовали усадьбы, парки, скверы, аллеи, уличные и одиночные озеленительные посадки вблизи бывших общественных зданий (школ, магазинов, контор сельхозпредприятий, сельских советов, отделений связи), где выявляли и определяли по [9], [10] виды деревьев и кустарников. Для каждого вида устанавливали наличие растений, произрастающих в б.н.п. до отселения и появившихся после эвакуации населения, а также их обилие по следующей глазомерной шкале: вид отсутствует – 0, встречается единичными экземплярами – 1, редко – 2, нередко – 3, часто – 4, растений много – 5, растений очень много – 6.

Анализ видового состава дендрофлоры б.н.п. ЗО ЧАЭС выполнен в соответствии с источниками [11]–[13] на основании полученных данных в модельных б.н.п., гербарного материала и литературных сведений [14] с проверкой наличия видов в природе.

Результаты и их обсуждение. По состоянию на 2019–2020 гг. в модельных б.н.п. ЗО ЧАЭС встречалось 75 видов, разновидностей и гибридов (далее таксонов) деревьев и кустарников, в том числе 34 вида, 1 разновидность и 4 гибрида деревьев, 34 вида и 2 гибрида кустарников (таблица 1). Из них 36 (48 %) таксонов являются местными лесными, 39 (52 %) – декоративными интродуцентами, плодово-ягодными и орехоплодными. Из 39 таксонов древесных растений 20 относятся к аборигенным лесным, 11 – к интродуцированным, 8 – к плодово-ягодным и орехоплодным, из 36 таксонов кустарников – 16 местных лесных, 20 – декоративных и плодово-ягодных.

Отселенные деревни различаются между собой по разнообразию дендрофлоры (таблица 2). На богатых почвах (Воротец, Вязок, Дуброва) количество таксонов деревьев и кустарников больше, чем в оставленных селениях на почвах легкого гранулометрического состава (Ломыш, Дроньки, Чикаловичи) в среднем на 34 %, в том числе деревьев – на 38 %. Дочернобыльское происхождение имеют 15–20 таксонов деревьев на бедных почвах и 24–26 на богатых. За прошедшее время в б.н.п. появилось по 2–7 местных лесных видов, а в Воротце созданы лесные культуры *Fraxinus lanceolata* Borkh. У некоторых декоративных и плодовых видов не выявлено естественного возобновления.

Таблица 1 – Состав и обилие видов деревьев и кустарников в модельных б.н.п. ЗО ЧАЭС (числитель – доаварийного происхождения, знаменатель – послеаварийного)

Виды, разновидности	Модельные б.н.п.					
	Ломыш	Дроньки	Чикаловичи	Воротец	Вязок	Дуброва
1	2	3	4	5	6	7
деревья						
<i>Acer negundo</i> L.	1–2/6	1/6	1/6	2/6	2/6	1/5
<i>A. platanoides</i> L.	1/2–3	1/1–3	3/2–4	1/2	2/2–3	1/2–3
<i>A. saccharinum</i> L.	–	–	–	–	3/1–2	–

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	1/0	–	1/0	2/1	1/1	1/1
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	–	1/1	0/1	–	–	1/2–3
<i>Armeniaca vulgaris</i> Lam. (<i>Prunus armeniaca</i> L.)	–	–	1/0	–	–	–
<i>Betula pendula</i> Roth (<i>B. verrucosa</i> Ehrh., <i>B. alba</i> auct. p. p. non L.)	1/2–4	1/1–3	1/3	1/1	1/2	1/3–4
<i>B. pubescens</i> Ehrh.	–	–	1/0	–	1/1	0/2
<i>Carpinus betulus</i> L.	–	–	–	–	1/1	0/1
<i>Cerasus vulgaris</i> Mill.	1/1	–	1/1–2	4/3	2/1	1/2–3
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	2/2–5	3/3–6	4/5	1/1–3	1/1	2/2–5
<i>F. lanceolata</i> Borkh. (<i>F. pennsylvanica</i> var <i>lanceolata</i> (Borkh.) Sarg.)	–	–	–	0/3	–	–
<i>Juglans regia</i> L.	–	–	–	1/1	1/1–2	1/0
<i>Malus domestica</i> Borkh., nom. conserv. prop. (<i>Pyrus malus</i> L.)	3/1	3/1	3/1	4/3	2–3/1	2–3/2
<i>Morus alba</i> L. (<i>M. nigra</i> auct. non L.)	1/1	3/1	3/1	–	–	1/0
<i>Padus avium</i> Mill.	–	–	1/2	2/2	1/2	1/2
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	–	1/1	–	1/0	1/0	1/1
<i>Pinus sylvestris</i> L.	0/1	0/1	1/1	0/1–2	0/1	0/1
<i>Populus alba</i> L.	1/2–3	1/2	1/1	2/3–4	–	1/1
<i>P. x canadensis</i> Moench (<i>P. nigra</i> x <i>P. monilifera</i> Aiton, <i>P. deltoids</i> auct. non W. Bartl. ex Marsch.)	–	–	–	1/0	1/0	–
<i>P. x moskoviensis</i> R. E. Schroed. ex Wolkenst. (<i>P. suaveolens</i> x <i>P. laurifolia</i> , <i>P. balsamifera</i> auct. p. p. non L.)	–	–	–	1/1	–	–
<i>P. nigra</i> L.	1/1	1/1	2/2	2/1	1/1	1/1
<i>P. nigra</i> L. var. <i>italica</i> Münchh.	–	–	–	–	–	1/0
<i>P. tremula</i> L.	0/2–4	0/2–3	0/1	1/3–4	1/2	0/3–5
<i>Prunus cerasifera</i> Ehrh. (<i>P. divaricata</i> Ledeb.)	–	1/1	–	1–2/1	1/1	–
<i>P. x domestica</i> L. (<i>P. cerasifera</i> x <i>P. spinosa</i>)	4/6	4/6	4/6	3–4/4	2/1	4/2–5
<i>Pyrus communis</i> L.	2/1	2/1	3/2	3/1–2	2/1	2/2
<i>Quercus rubra</i> L.	–	–	–	–	–	1/1
<i>Q. robur</i> L.	1/2–3	1/2–3	1/3	1/1	1/2	1/2–4
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	2/6	1/6	2/6	3/3	1–2/1	1/2
<i>Salix alba</i> L.	0/1	1/0	0/1	1–2/3	3/1–2	2/2
<i>S. caprea</i> L.	0/1	–	–	0/1	0/1	0/2–3
<i>S. x fragilis</i> L. (<i>S. x rubens</i> Schrank, <i>S. alba</i> x <i>S. euxina</i>)	–	–	–	1/0	1/0	0/1
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	–	0/1	–	–	0/1	0/1
<i>Thuja occidentalis</i> L.	–	–	–	–	1/0	–
<i>Tilia cordata</i> Mill.	1/0	1/1	1/0	2/1–3	1/2	2/3
<i>Ulmus glabra</i> Huds. (<i>U. scabra</i> Mill.)	–	–	3/3–4	–	–	–
<i>U. laevis</i> Pall.	–	1/2	–	3/3	2/2–3	1/1
<i>U. minor</i> Mill. (<i>U. suberosa</i> Moench, <i>U. carpinifolia</i> Rupp. ex Suckow <i>U. campestris</i> auct. non L.)	–	–	–	–	–	1/1
кустарники						
<i>Amelanchier spicata</i> (Lam.) C. Koch	1/0	1/1	1/0	2–3/1	2/1	3/2
<i>Berberis vulgaris</i> L.	–	–	–	1/0	1/2	–
<i>Chaenomeles japonica</i> (Thunb.) Lindl. Ex Spach (<i>C. maulei</i> (Mast.) Lavallée)	–	–	–	–	–	0/1
<i>Chamaecytisus ruthenicus</i> (Fisch. ex Woloszcz.)	–	–	–	0/1	–	–
<i>Corylus avellana</i> L.	–	0/1	0/1	0/1	0/2	0/2–3
<i>Crataegus chlorocarpa</i> Lennéet C. Koch (<i>C. altaica</i> (Loud.) Lange)	–	1/1	–	–	–	1/1
<i>Cr. submollis</i> Sarg.	1/0	–	–	–	–	–
<i>Cr. monogyna</i> Jacq.	–	–	0/1	–	1/1	–
<i>Euonymus europaea</i> L.	0/1–3	0/2	0/4–5	0/2	0/2	0/3
<i>Frangula alnus</i> Mill. (<i>Rhamnus frangula</i> L.)	0/2	0/2–3	0/2	0/1	–	0/2
<i>Hippophaë rhamnoides</i> L.	–	–	–	–	1/1	1/0
<i>Juniperus communis</i> L.	1/1	–	–	–	–	–
<i>Phyladelphus coronaries</i> L.	1/0	1/0	–	1/0	1/0	1/0
<i>Rhamnus cathartica</i> L.	–	–	–	0/2	–	–
<i>Ribes aureum</i> Pursh (<i>R. odoratum</i> H. L. Wendl.)	–	0/3	0/2	0/1	–	–
<i>R. nigrum</i> L.	0/1	0/4	0/2	0/2	0/1	0/1–3
<i>R. spicatum</i> Robson (<i>R. rubrum</i> auct. p. p. non L.)	0/1	0/4	0/2	–	0/1	0/1
<i>R. uva-crispa</i> L. (<i>Grossularia uva-crispa</i> (L.) Mill., incl. <i>G. reclinata</i> (L.) Mill.)	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/2

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
<i>Rosa caesia</i> Smith	–	–	–	–	–	0/1
<i>R. canin</i> L.	–	0/2	–	3/2	2/1	0/1–3
<i>R. cinnamomea</i> L., nom. cons. (<i>R. majalis</i> Herrm.)	0/2	–	–	–	–	–
<i>R. x malyi</i> A. Kern. (<i>R. pendulina</i> x <i>R. cinnamomea</i> , <i>R. pratorum</i> auct. p. p. non Sukacz., ? <i>R. gorinkensis</i> Bess.)	–	–	–	–	–	0/1
<i>R. sherardii</i> Davies	–	–	–	–	–	0/1
<i>Salix acutifolia</i> Willd.	0/1	0/1	–	–	–	0/1
<i>S. aurita</i> L.	0/1	–	0/1	–	–	0/2
<i>S. cinerea</i> L.	–	0/2	–	0/2	–	0/2–5
<i>S. myrsinifolia</i> Salisb. (<i>S. nigricans</i> (Sm.) Enand)	–	–	–	–	–	0/1
<i>S. pentandra</i> L.	–	–	–	–	–	1/1–2
<i>S. rosmarinifolia</i> L.	–	0/2	–	–	–	–
<i>Sambucus nigra</i> L.	–	–	–	0/1	–	–
x <i>Sorbaronia mitschurinii</i> (A. Skvorts. et Maitul.) Sennikov (<i>Sorbus aucuparia</i> x <i>Aronia melanocarpa</i> (Michx) Elliott, <i>A. mitschurinii</i> A. Skvorts. et Maitul.)	–	1/0	–	–	–	1/1
<i>Spiraea chamaedrifolia</i> L.	1/1	–	–	–	–	–
<i>Swida sanguine</i> (L.) Opiz	–	–	0/1	–	0/1	–
<i>Symphoricarpus rivularis</i> Suksdorf (<i>S. albus</i> auct. non (L.) Blake)	–	–	–	1/1	–	2/2
<i>Syringa vulgaris</i> L.	4/3	4/3	4/3	3–4/2–3	2/1	3/2
<i>Viburnum opulus</i> L.	0/1	0/1	0/1	1/1	1/1–2	1/2

Таблица 2 – Распределение таксонов древесно-кустарниковых растений в б.н.п. по группам

Группа таксонов	Модельные б.н.п.					
	Ломыш	Дроньки	Чикаловичи	Воротец	Вязок	Дуброва
деревья						
Произраставшие до отселения, в т.ч.:	15	18	20	24	26	24
не дающие возобновления	2	1	4	3	4	3
Появившиеся после отселения	4	3	3	3	3	7
Итого	19	21	23	27	29	31
кустарники						
Произраставшие до отселения, в т.ч.:	10	10	6	10	10	17
– дающие возобновление	3	3	1	5	6	7
– не дающие возобновление	3	2	1	2	1	2
– сохранились только в виде возобновления	4	5	4	3	3	8
Появившиеся после отселения	5	7	7	7	4	7
Итого	15	17	13	17	14	24
Всего пород деревьев и кустарников	34	38	34	44	43	55

На видовое разнообразие кустарников влияет их недолговечность и подчиненное положение в лесных фитоценозах. На богатых почвах, в сравнении с бедными, большее общее количество видов кустарников (в среднем 22 %), видов сохранившихся со времени ухода населения (в среднем на 40 %) и видов дающих возобновление (в среднем в 2,6 раза). Единичные виды в каждом б.н.п. не дают потомства. От 3 до 8 видов кустарников сохранились только в виде молодых поколений. От 4 до 7 лесных видов этой биоморфической группы заселились в б.н.п. в послечернобыльский период.

На богатых почвах в «лесном» б.н.п. (Дуброва) дендрофлора разнообразнее, чем в «полевых» (Воротец, Вязок), а в «полевых» – богаче, чем в расположенных вблизи лесов на почвах легкого гранулометрического состава (таблица 2).

Установлены значительные различия относительного распространения видов в б.н.п. (таблица 1). По количеству растений доминирует *Acer negundo* L. На бедных почвах очень широко распространены *Prunus x domestica* L. и *Robinia pseudoacacia* L. Почти везде встречается *Fraxinus excelsior* L. Его подрост обилен вблизи семенных деревьев. Активно заселяет усадьбы *Populus tremula* L. Довольно многочисленна *Betula pendula* Roth. На плодородных почвах часто встречается *Ulmus laevis* Pall. Во всех деревнях в значимых количествах присутствует *Quercus robur* L. Он наиболее равномерно распределен по площади. В сопоставимых с ним количествах

оценивается присутствие *Acer platanoides* L., возобновление которого локализовано вблизи семенников. Устойчивые и расширяющиеся в пространстве куртины образует *Populus alba* L. Медленно расселяются по б.н.п. *Tilia cordata* Mill. и *Salix alba* L., еще медленнее – *Pinus sylvestris* L., *Populus nigra* L. Распространение прочих видов незначительно. Многие виды, прежде всего плодовые, сокращают свою численность.

Из кустарников в б.н.п. наиболее широко представлена *Syringa vulgaris* L. Однако, по мере смыкания древесного яруса, она, как и другие антропофитные виды кустарников, вытесняется из фитоценозов. Медленно, но неуклонно растет количество местных лесных видов, прежде всего *Euonymus europaea* L. и *Frangula alnus* Mill., в меньших количествах – *Salix cinerea* L., *Corylus avellana* L. Сохраняется заметное присутствие *Ribes nigrum* L.

Согласно гербарным материалам и литературным данным [14], подтвержденным натурными обследованиями, в остальных отселенных деревнях, помимо модельных, произрастает 37 видов, включая гибридогенные, и 1 разновидность древесно-кустарниковых растений (таблица 3).

Таблица 3 – Виды деревьев и кустарников, произрастающих в б.н.п. ЗО ЧАЭС (кроме модельных)

Виды, разновидности	Жизненная форма	Б.н.п.
1	2	3
<i>Aesculus x carnea</i> Hayn (<i>A. hypocastanum x A. pavia</i> L.)	дерево	Осиповка
<i>Amelanchier spicata x A. alnifolia</i> (Nutt.) Nutt. ex M. Roem	кустарник	Острогляды
<i>Betula pendula</i> var. <i>carelica</i> (Mercklin) Hamet-Ahti	дерево	Выгребная Слобода
<i>Buxus sempervirens</i> L.	кустарник	Залесье
<i>Caragana arborescens</i> Lam.	кустарник	Бабчин, Посудово
<i>Cerasus tomentosa</i> (Thunb.) Wall. ex T. T. Yü et C. L. Li (<i>Microcerasus tomentosa</i> (Thunb.) Ereminet Yushev)	кустарник	Острогляды, Пучин
<i>Cotoneaster lucidus</i> Schlecht. (<i>C. [lucida]</i> Schlecht., <i>C. acutifolius</i> Turcz. var. <i>lucidus</i> (Schltdl.) L. T. Lu)	кустарник	Солнечный
<i>Crataegus sanguine</i> Pall.	кустарник	Дроньки
<i>Euonymus verrucosa</i> Scop.	кустарник	Бабчин
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsch	дерево	Карповичи
<i>Larix decidua</i> Mill.	дерево	Бабчин
<i>Parthenocissus vitacea</i> (Kner) Hitchc. (<i>P. inserta</i> auct. non (A. Kern.) Fritsch, <i>P. quinquefolia</i> auct. Non (L.) Planch.)	лиана	Бабчин, Воротец, Вязок, Чикаловичи
<i>Phyladelphus inodorus</i> L.	кустарник	Солнечный
<i>Ph. lewissii</i> Pursh	кустарник	Вяжище
<i>Ph. pubescens</i> Lois.	кустарник	Дерновичи
<i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.	кустарник	Дерновичи, Залесье,
<i>Picea pungens</i> Engelm.	дерево	Выгребная Слобода
<i>Populus x canescens</i> (Aiton) Smith (<i>P. alba x P. tremula</i> , <i>P. alba</i> auct. p. p. non L.)	дерево	Глуховичи, Колыбань
<i>P. x jackii</i> Sarg. (<i>P. deltoides x P. balsamifera</i> L., ? <i>P. x generosa</i> auct. non A. Henry).	дерево	Бабчин
<i>P. laurifolia</i> Ledeb.	дерево	Вепры
<i>P. maximowiczii</i> A. Henry	дерево	Бабчин
<i>Prunus insiticia</i> L.	кустарник	Солнечный
<i>Rhus typhina</i> L.	кустарник	Богуши, Глуховичи
<i>Rosa dumalis</i> Bechst. s. str	кустарник	Выгребная Слобода
<i>R. x francofurtiana</i> Munchh. (<i>R. cinnamomea x R. centifolia</i> , <i>R. x turbinata</i> Aiton, non Schmalh)	кустарник	Бабчин, Осиповка
<i>R. glabrifolia</i> C. A. Mey ex Rupr. (<i>R. pratorum</i> auct. non Sukacz.)	кустарник	Залесье, Колыбань
<i>R. x regeliana</i> Linden et André (<i>R. x spaethiana</i> auct. non Graebn., <i>R. rugosa x R. davurica</i> Pall.)	кустарник	Радин, Уласы
<i>R. rubiginosa</i> L.	кустарник	Осиповка
<i>R. spinosissima</i> L. (<i>R. pimpinellifolia</i> L. p. p., nom. ambig.)	кустарник	Бабчин
<i>R. x subcanina</i> (Christ) Dalla Torre et Sarnth. (? <i>R. canina x R. dumalis</i>)	кустарник	Глуховичи
<i>R. villosa</i> L. (<i>R. pomifera</i> Herrm.)	кустарник	Глуховичи
<i>Salix x sepulcralis</i> Simonk (<i>S. albas</i> L. x <i>S. babylonica</i> L., <i>S. babylonica</i> auct. non L.)	дерево	Выгребная Слобода
<i>S. starkeana</i> Willd.	кустарник	Бабчин
<i>Sambucus racemosa</i> L.	кустарник	Бабчин
<i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A. Br. (<i>Spiraea sorbifolia</i> L.)	кустарник	Дерновичи
<i>Swida alba</i> (L.) Opiz	кустарник	станция Посудово
<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	дерево	Солнечный
<i>Vitis riparia</i> Michx (<i>V. vinifera</i> auct. non L.)	лиана	Воротец, Вязок

Таким образом, современная дендрофлора б.н.п. ЗО ЧАЭС Беларуси включает 113 таксонов: 111 видов, включая гибридогенные, и 2 разновидности, относящиеся к 54 родам и 26 семействам отделов Magnoliophyta (105 видов из 49 родов и 24 семейств) и Pinophyta (6 видов из 5 родов и 2 семейств). В ее составе 37 (33,3 %) аборигенных видов и 74 (66,7 %) адвентивных. Отметим, что на 2005 г. в б.н.п. ЗО ЧАЭС Украины насчитывалось 129 древесно-кустарниковых видов, в том числе 47 аборигенных и 82 интродуцированных [15].

Биоморфологическая структура анализируемой группы растений представлена 48 (43,2 %) видами деревьев, 61 (55,0 %) видом кустарников и 2 (1,8 %) видами одревесневающих лиан, относящихся к фанерофитам. Из них 55 видов нанофанерофиты, 23 – микрофанерофиты и 33 – мезофанерофиты.

Абсолютное большинство б.н.п. расположено на свежих почвах, поэтому по отношению к влажности субстрата в них доминируют мезофиты (93 вида, или 83,8 % от всей дендрофлоры). Гигромезофиты, мезогигрофиты и ксеромезофиты представлены небольшим и равным количеством видов (таблица 4).

Таблица 4 – Распределение видов растений б.н.п. по экологическим группам

Экологические группы по увлажнению	Количество видов, шт.	% от общего числа видов	Экологические группы по трофности	Количество видов, шт.	% от общего числа видов
Ксеромезофиты	6	5,4	Олигомезотрофы	4	3,6
Мезофиты	93	83,8	Мезотрофы	85	76,6
Мезогигрофиты	6	5,4	Мезоэвтрофы	11	9,9
Гигромезофиты	6	5,4	Эвтрофы	11	9,9

Преобладающей экологической группой растений по отношению к трофности почвы являются мезотрофы (таблица 4). Видов, предъявляющих высокую (мезоэвтрофы) и очень высокую (эвтрофы) требовательность к плодородию почв, немного. Еще реже встречаются олигомезотрофы – виды, способные произрастать на относительно бедных почвах.

Среди аборигенов наибольшим количеством видов (16) выделяется европейский географический элемент, который представлен паневропейским (9 видов), восточноевропейским (5), средиземноморским (1) и западноевропейским (1) субэлементами. Скромнее представлена дендрофлора евросибирского (9 видов), евразийского (6), евросибирско-аралокаспийского (3), европейско-малоазийского (2) и голарктического (1) ареалов.

По отношению к солярно-климатическим зонам Евразии доминирует умеренная группа аборигенных видов (17), представленная бореальными (9), бореально-сарматскими (4) и сарматскими (4) видами. Из 11 умеренно-теплолюбивых и теплолюбивых видов 10 являются сармато-понтическими и 1 понтическим. Плюризональных видов 6. В группе умеренно-холодостойких видов 2 аркто-бореальных и 1 аркто-борео-сарматский.

Адвентивная дендрофлора антропогенно трансформированных ландшафтов отселенных деревень по времени заноса является неофитной (занесенной после XV века). Преобладают (35) виды евразийского происхождения, из которых 10 европейских, 11 азиатских и 14 широко распространенных в умеренной зоне. Выходцами из Северной Америки являются 20 видов, из Северного Кавказа – 2, из Средиземноморья – 1. Гибридогенное происхождение имеют 16 видов. По способу заноса вся адвентивная дендрофлора б.н.п. представлена группой эргазиофитов. Большинство их (60 видов) является колонофитами. Меньшим количеством представлены эпикофиты (4 вида) и агрофиты (10).

В б.н.п. ЗО ЧАЭС произрастает 4 чужеродных вредоносных вида деревьев, 6 кустарников и 1 лиана. Почти во всех отселенных деревнях встречаются *Acer negundo* L., *Robinia pseudoacacia* L. и *Populus alba* L. Эти виды наиболее многочисленны и агрессивны. Они вместе с расселившимися в лесах *Amelanchier spicata* (Lam.) C. Koch.) и *Sambucus racemosa* L. создают наибольшую угрозу для естественных фитоценозов.

Заключение. В отселенных деревнях белорусского сектора ЗО ЧАЭС через 34 года после эвакуации населения образовались лесные фитоценозы. Состав древесных и подростово-подлесочных ярусов в них первоначально формировался под влиянием дендрофлоры самих б.н.п. и сопредельных территорий, плодородия почв, позже – конкурентных взаимоотношений в лесных сообществах.

Современная дендрофлора отселенных деревень включает 111 видов и 2 разновидности, входящих в состав 54 родов, 26 семейств, 2 отделов. В ее составе 48 видов и 2 разновидности деревьев, 61 вид кустарников и 2 вида одревесневающих лиан, представленные группами аборигенных (37) и адвентивных (74) видов. В числе последних 16 гибридов и гибридогенных видов. Выполнен краткий анализ дендрофлоры. Приведена оценка относительного распространения отдельных видов по б.н.п. Из 11, произрастающих в них чужеродных вредоносных древесно-кустарниковых видов, пять, наиболее агрессивных, представляют серьезную экологическую опасность для растительных сообществ ЗО ЧАЭС.

Литература

1. Багинский, В. Ф. Лесообразовательные процессы в местах поселений, перемещенных после аварии на Чернобыльской АЭС / В. Ф. Багинский, М. В. Кудин // Международный практический журнал «Лесная таксация и лесоустройство». – 2009. – №1 (41). – С. 12–17.
2. Геология Беларуси / А. С. Махнач [и др.]. – Минск : ИГН НАН Беларуси, 2001. – 815 с.
3. Матвеев, А. В. Рельеф Белоруссии / А. В. Матвеев, Б. Н. Гурский, Р. И. Левицкая. – Минск : Университетское, 1988. – 320 с.
4. Почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника = Soil of Polesye state radiation-ecological reserve / В. В. Лапа [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 97 с.
5. Флора и растительность Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / В. И. Парфенов [и др.]. – Мозырь : Белый ветер, 2002. – 112 с.
6. Маленок, Л. В. Новые виды сосудистых растений флоры Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Л. В. Маленок, Г. Д. Матусов, А. В. Шамро // Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития : сб. науч. тр., посвященный 25-летию Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Полесский государственный радиационно-экологический заповедник ; под общ. ред. Ю. И. Бондаря. – Минск, 2013. – С. 171–184.
7. Флора сосудистых растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / М. В. Кудин [и др.]. // Сб. науч. ст. / Управление делами Президента Республики Беларусь, Березинский биосферный заповедник. – Минск, 2014. – Вып. 9 : Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования. – С. 85–125.
8. Турчин, Л. М. Дополнение к списку флоры сосудистых растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Л. М. Турчин // Сб. науч. ст. / Управление делами Президента Респ. Беларусь, Березинский биосферный заповедник. – Минск, 2016. – Вып. 11 : Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования. – С. 134–139.
9. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Минск : Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
10. Флора Беларуси. Сосудистые растения : в 6 т. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперимент. ботаники им. В.Ф. Купревича ; редкол.: Р. Ю. Блажевич [и др.] ; под общ. ред. В. И. Парфенова. – Минск : Беларус. навука, 2009. – Т. 1 : Lycopodiophyta. Equisetophyta. Ginkgophyta. Pinophyta. Gnetophyt. – 2009. – 199 с.
11. Козловская, Н. В. Флора Белоруссии: закономерности ее формирования, научные основы использования и охраны / Н. В. Козловская. – Минск : Наука и техника, 1978. – 128 с.
12. Козловская, Н. В. Хорология флоры Белоруссии / Н. В. Козловская, В. И. Парфенов. – Минск : Наука и техника, 1972. – 312 с.
13. Черная книга флоры Беларуси: чужеродные вредоносные растения / Д. В. Дубовик [и др.] ; под общ. ред. В. И. Парфенова, А. В. Пугачевского ; Нац. акад. Наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 407 с.
14. Новые данные о распространении некоторых редких и охраняемых видов сосудистых растений флоры Беларуси / Д. В. Дубовик [и др.] // Сб. науч. тр. / НАН Беларуси, ИЭБ им. В. Ф. Купревича. – Минск, 2018. – Вып. 47 : Ботаника (исследования). – С. 32–51.
15. Петров, М. Ф. Формирование лесных растительных группировок в населенных пунктах Чернобыльской зоны отчуждения / М. Ф. Петров // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2005. – Вып. 63: Проблемы лесоведения и лесоводства (Институт леса НАН Беларуси – 75 лет). – С. 496–498.

Хлороформные и этилацетатные экстракты пяти видов лишайников: фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства

О.М. ХРАМЧЕНКОВА¹, М.В. МАТВЕЕНКОВ²

In vitro оценивали фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства хлороформных и этилацетатных экстрактов из распространенных в Беларуси лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* и *Xanthoria parietina* в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT). Установлено, что данные экстракты не являются фотозащитными, обладают фотомодифицирующим действием при облучении культур кератиноцитов ультрафиолетом. Цитотоксичными для культур кератиноцитов человека линии HaCAT были хлороформные экстракты *C. arbuscula*, *H. physodes* и *X. parietina*; этилацетатные – *C. arbuscula*. Хлороформный и этилацетатный экстракты *R. pollinaria* (2,5 ÷ 5,0 мкг/мл) проявляли слабые фотопротекторные свойства. Хлороформные экстракты *E. prunastri* и *H. physodes* (2,5 мкг/мл) и этилацетатные экстракты *E. prunastri* (2,5 мкг/мл), *H. physodes* (2,5 ÷ 5,0 мкг/мл), *R. pollinaria* (10 мкг/мл) фотомодифицирующих свойств не проявляли. Все остальные растворы экстрактов проявляли фотосенсибилизирующие свойства, причем экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* усиливали поражающее действие ультрафиолета в 4 ÷ 95 раз. При наращивании доз облучения культур кератиноцитов ультрафиолетом от нулевых до летальных значений с ростом концентрации экстрактов лишайников в питательной среде повышалась их фотосенсибилизирующая активность. **Ключевые слова:** экстракты лишайников, солнцезащитный фактор (SPF), критическая длина волны ($\lambda_{\text{крит}}$), отношение УФ-А/УФ-Б, культуры кератиноцитов (HaCAT), ультрафиолет, полуингибирующая доза (ID_{50}), фотопротекторы, фотосенсибилизаторы.

In vitro, the photoprotective, cytotoxic and photomodifying properties of chloroform and ethyl acetate extracts from the widely distributed in Belarus lichens *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* and *Xanthoria parietina* in the culture of human keratinocytes (HaCAT), are estimated. It was found that these extracts are not photoprotective, they have a photomodifying effect upon irradiation of keratinocyte cultures with ultraviolet light. Chloroform extracts of *C. arbuscula*, *H. physodes*, and *X. parietina* were cytotoxic for human keratinocyte cultures of the HaCAT line; ethyl acetate – *C. arbuscula*. Chloroform and ethyl acetate extracts of *R. pollinaria* (2,5 ÷ 5,0 µg/ml) showed weak photoprotective properties. Chloroform extracts of *E. prunastri* and *H. physodes* (2,5 µg/ml) and ethyl acetate extracts of *E. prunastri* (2,5 µg/ml), *H. physodes* (2,5 ÷ 5,0 µg/ml), *R. pollinaria* (10 µg/ml) did not show photomodifying properties. All other solutions of extracts exhibited photosensitizing properties, and extracts of *C. arbuscula* and *X. parietina* increased the damaging effect of ultraviolet radiation by 4 ÷ 95 times. With increasing doses of ultraviolet irradiation of keratinocyte cultures from zero to lethal values, with an increase in the concentration of lichen extracts in the nutrient medium, their photosensitizing activity increased.

Keywords: lichen extracts, sunscreen factor (SPF), critical wavelength (λ_{crit}), UV-A/UV-B ratio, keratinocyte culture (HaCAT), ultraviolet, semi-inhibitory dose (ID_{50}), photoprotectors, photosensitizers.

Введение. Фотозащитные и цитотоксические свойства экстрактов лишайников изучают последние несколько десятилетий. Для некоторых экстрактов показана довольно высокая степень фотозащиты, отсутствие токсичности для клеточных культур [1]–[3]. Вместе с тем, обнаружено фотосенсибилизирующее действие экстрактов лишайников в отношении культур кератиноцитов [4], [5]. Поэтому широкий скрининг фотозащитных, цитотоксических и фотомодифицирующих свойств экстрактов лишайников составляет актуальную научную задачу. Для получения экстрактов хлороформ используют очень часто, этилацетат – очень редко [6]–[9].

Целью настоящего исследования была *in vitro* оценка цитотоксических и фотомодифицирующих свойств хлороформных и этилацетатных экстрактов пяти видов лишайников, распространенных на юго-востоке Беларуси.

Методы исследований. Биомассу лишайников *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. и *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. отбирали в пригородных лесах, высушивали, измельчали, экстрагировали хлороформом и этилацетатом в аппарате Сокслета. Растворитель удаляли, экстракты высушивали, после чего использовали для исследований.

Растворы сухих экстрактов лишайников в этаноле использовали для фотометрии по методике, описанной в [4], [10]. Средство измерения – УФ-спектрофотометр Solar PB 2201, измерительные кюветы – кварцевые. По результатам фотометрии рассчитывали величины SPF, $\lambda_{\text{крит}}$ и соотношения УФ-А/УФ-Б – основных показателей фотозащитности экстрактов лишайников [4], [10].

Эпителиальные клетки человека линии HaCAT (кератиноциты), полученные в НИЛ проблем терморегуляции кафедры физиологии человека и животных Белорусского государственного университета, культивировали согласно рекомендациям американской коллекции типовых культур (АТСС) [11]. Определение цитотоксичности экстрактов лишайников в отношении кератиноцитов, расчеты величины фактора изменения цитотоксичности (ФИЦ), оценку влияния дозы ультрафиолета и экстрактов лишайников на жизнеспособность клеточных культур изучали по методике, изложенной в [4], [10].

Анализ результатов исследования производили с помощью программных продуктов Graph Pad Prism (Version 5.02) и Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. При экстрагировании биомассы хлороформом и этилацетатом не только выход экстрактов, но и их фотозащитные свойства для определенного вида лишайников оказались очень близкими – таблица 1.

Таблица 1 – Фотозащитные свойства экстрактов лишайников

Вид лишайников	Экстрагент	Выход экстракта, %	SPF	$\lambda_{\text{крит}}$, нм	УФ-А/УФ-Б
<i>C. arbuscula</i>	хлороформ	3,1 ± 0,47	7,2 ± 0,74	368 ± 4,39	0,93 ± 0,094
	этилацетат	3,2 ± 0,53	9,4 ± 0,97	372 ± 5,01	1,02 ± 0,081
<i>E. prunastri</i>	хлороформ	9,8 ± 1,49	39,6 ± 2,05	344 ± 5,25	0,34 ± 0,054
	этилацетат	8,9 ± 1,18	40,4 ± 2,18	351 ± 5,39	0,39 ± 0,058
<i>H. physodes</i>	хлороформ	10,8 ± 1,34	21,9 ± 1,84	346 ± 3,49	0,65 ± 0,073
	этилацетат	12,6 ± 1,22	22,4 ± 1,82	347 ± 7,86	0,63 ± 0,069
<i>R. pollinaria</i>	хлороформ	7,4 ± 0,87	39,9 ± 2,11	330 ± 9,21	0,24 ± 0,044
	этилацетат	10,2 ± 1,22	39,5 ± 1,83	328 ± 8,49	0,21 ± 0,039
<i>X. parietina</i>	хлороформ	3,9 ± 0,37	4,6 ± 0,87	385 ± 7,18	1,11 ± 0,086
	этилацетат	3,3 ± 0,66	4,5 ± 0,76	376 ± 6,94	0,86 ± 0,074

Из биомассы *C. arbuscula* и *X. parietina* при помощи хлороформа и этилацетата извлекается 3–4 % экстрактивных веществ, тогда как из *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria* – около десяти процентов. Среди хлороформных и этилацетатных экстрактов лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* фотозащитных не обнаружено. Ни один из них не имеет одновременно таких фотозащитных свойств, как SPF ≥ 15,0 и $\lambda_{\text{крит}} \geq 373,0$ [12]. Следует отметить, что экстракты *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria* весьма эффективны в области УФ-Б (290 ÷ 320 нм), будучи при этом малоактивными в области УФ-А (320 ÷ 400 нм).

Цитотоксические свойства хлороформных и этилацетатных экстрактов лишайников существенно отличались и не были схожими для одного вида лишайников – таблица 2.

Таблица 2 – Цитотоксический эффект экстрактов лишайников в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT), оцененный с помощью МТТ-теста после 48 часов инкубации

Вид лишайника	Экстрагент	В микрограммах на миллилитр		
		IC ₁₀ *	IC ₅₀	IC ₉₀ *
<i>C. arbuscula</i>	хлороформ	4,9	20,7 ± 1,76	71,2
	этилацетат	16,4	32,6 ± 2,15	59,6
<i>E. prunastri</i>	хлороформ	22,1	52,8 ± 4,87	>200
	этилацетат	41,1	69,0 ± 8,19	>200
<i>H. physodes</i>	хлороформ	12,9	27,7 ± 2,43	59,3
	этилацетат	14,6	34,0 ± 2,11	80,4
<i>R. pollinaria</i>	хлороформ	20,4	52,9 ± 6,93	>200
	этилацетат	38,2	76,4 ± 4,70	172
<i>X. parietina</i>	хлороформ	3,7	28,3 ± 5,33	>200
	этилацетат	9,7	41,7 ± 6,20	>200

Примечание: * – значения IC₁₀ и IC₉₀ вычислены по уравнениям аппроксимации кривых влияния концентрации экстрактов лишайников на жизнеспособность культур клеток.

Нетоксичными для культур кератиноцитов были экстракты хлороформные экстракты *E. prunastri* и *R. pollinaria*; этилацетатные экстракты *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina*. Хлороформные экстракты *H. physodes* и *X. parietina*, а также этилацетатный экстракт *C. arbuscula* были «условно» цитотоксичными – значения IC_{50} были близки к нормативному значению – 30 мкг/мл [13]. По критерию цитотоксичности для кератиноцитов анализируемые экстракты лишайников могут быть также разделены на две группы: сублетальные концентрации сопоставимы с полумлетальными; сублетальные концентрации в $4 \div 10$ раз выше полумлетальных.

Для оценки фотомодифицирующих возможностей экстрактов лишайников устанавливали субтоксичные, полумтоксичные и токсичные дозы ультрафиолета в отношении культуры кератиноцитов HaCAT. В качестве модификаторов эффектов ультрафиолета в отношении клеточных культур использовали хлороформные и этилацетатные экстракты лишайников в концентрациях 2,5; 5,0 и 10 мкг/мл. Определяли величины полуингибирующих доз ультрафиолета в опыте (в присутствии растворов экстрактов лишайников) и в контроле (без экстрактов лишайников в питательной среде). Отношение равноэффектных доз ультрафиолета в опыте и контроле представляет собой фактор изменений цитотоксичности (ФИЦ). При $ФИЦ > 1$ экстракт лишайника (модификатор фоточувствительности) является фотопротектором, при $ФИЦ < 1$ – фотосенсибилизатором. Для оценки возможного вклада антиоксидантных механизмов действия экстрактов лишайников на цитотоксичность ультрафиолета применяли Тролокс (6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновая кислота) – широко применяемый в подобного рода исследований модельный антиоксидант, который вносили в питательную среду в количестве 2,5; 5,0 и 10 мкг/мл вместо экстракта лишайника. Результаты приведены на рисунке 1.

Установлено, что хлороформные и этилацетатные экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* являются сильно выраженными фотосенсибилизаторами, усиливающими поражающее действие ультрафиолета $4 \div 95$ раз, или полностью подавляющими жизнеспособность кератиноцитов при облучении их самыми малыми дозами излучения (этилацетатный экстракт *C. arbuscula*, $5,0 \div 10$ мкг/мл). Хлороформные экстракты *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria*; а также этилацетатные экстракты *E. prunastri* и *H. physodes* в концентрации 10 мкг/мл также проявляли фотосенсибилизирующую активность – усиливали поражение кератиноцитов ультрафиолетом в облучения в $3,2 \div 6,3$ раза.

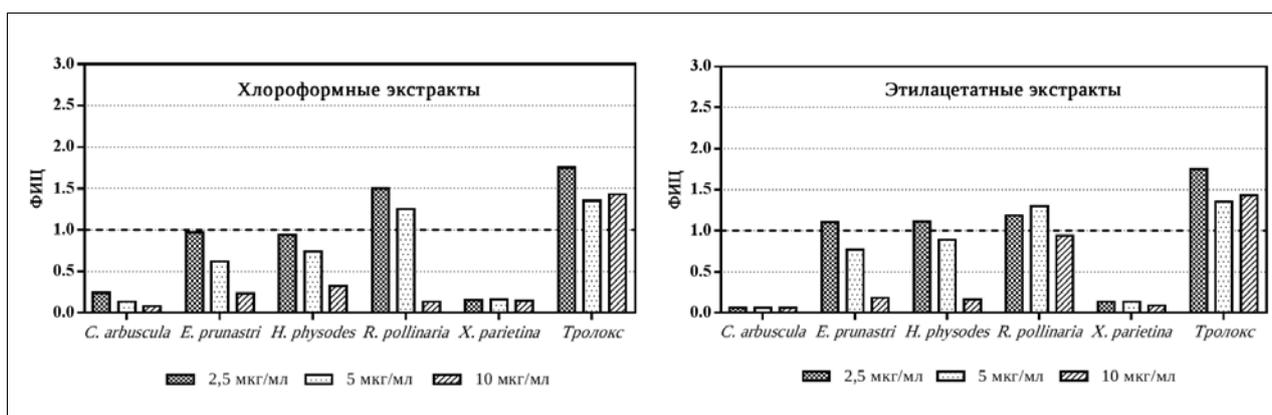


Рисунок 1 – Модификация цитотоксичности ультрафиолета в отношении культур кератиноцитов человека (HaCAT): а – хлороформными экстрактами; б – этилацетатными экстрактами лишайников

Хлороформные экстракты *E. prunastri* и *H. physodes* (2,5 мкг/мл) и этилацетатные экстракты *E. prunastri* (2,5 мкг/мл), *H. physodes* (2,5 ÷ 5,0 мкг/мл), *R. pollinaria* (10 мкг/мл) фотомодифицирующих свойств не проявляли.

Слабые фотопротекторные свойства проявляли хлороформный и этилацетатный экстракты *R. pollinaria* (2,5 ÷ 5,0 мкг/мл), ослаблявшие поражающее действие ультрафиолета до 1,5 раз.

Таким образом, выраженность фотомодифицирующего действия экстрактов лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* зависит от их концентрации в среде культивирования кератиноцитов человека линии HaCAT.

При наращивании доз облучения культур кератиноцитов ультрафиолетом от нулевых до летальных значений фотомодифицирующие свойства хлороформных и этилацетатных экстрактов лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* проявлялись схожим образом (рисунок 2).

Показавший фотопротекторный эффект, хлороформный экстракт *R. pollinaria* в концентрации 2,5 мкг/мл умеренно снижал жизнеспособность клеток в области низких доз (1–3 мДж/см²) и повышал в области высоких (4–20 мДж/см²). Данная область фотопротекции почти совпадает с таковой у модельного антиоксиданта – Тролокса. Аналогичная тенденция в модификации эффектов облучения наблюдалась для этилацетатного экстракта того же вида, а также для экстрактов *H. physodes* и *E. prunastri*. Однако количественно в их действии проявлялось более выраженное фотосенсибилизирующее действие в области малых доз ультрафиолета и более слабая фотозащита в области высоких доз. Экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina*, значительно усиливавшие фоточувствительность клеточных культур на протяжении градиента доз, вплоть до 6 мДж/см², проявляли некоторые фотопротекторные свойства при более высоких дозах.

Увеличение концентрации экстрактов до 5 мкг/мл усиливало фотосенсибилизационную активность экстрактов лишайников в области малых доз ультрафиолета. При этом сохранялись некоторые фотопротекторные свойства экстрактов лишайников в области высоких доз облучения. Все это справедливо для случаев сравнения опытных серий культур кератиноцитов с контролем, но не для сравнения с сериями, где использовался Тролокс. Фотозащитные характеристики экстрактов лишайников всегда были «хуже», чем у Тролокса, что позволяет предположить наличие иного, не антиоксидантного механизма «противостояния» клеточных культур последствиям их облучения высокими дозами ультрафиолета. Экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* были наиболее мощными фотосенсибилизаторами.

При внесении в питательную среду кератиноцитов экстрактов лишайников в концентрации 10 мкг/мл наблюдались выраженные эффекты усиления токсического действия ультрафиолета для всех экстрактов, кроме этилацетатного *R. pollinaria*. Жизнеспособность кератиноцитов снижалась до значений 60 % и меньше при облучении их самыми низкими экспериментальными дозами (0,46 мДж/см²), причем данный эффект усиливался на протяжении всего градиента доз. Фотосенсибилизирующая активность экстрактов *X. parietina* практически сравнивалась с таковой для *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria*. Экстракты *C. arbuscula* были губительными для кератиноцитов.

Таким образом характер модификации хлороформными и этилацетатными экстрактами лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* повреждающего действия ультрафиолета в отношении культур кератиноцитов человека линии HaCAT зависит как от концентрации экстрактов в питательной среде, так и от величин доз ультрафиолетового излучения. По мере увеличения концентрации экстрактов баланс эффектов протекция/сенсibilизация смещается в сторону усиления токсического действия ультрафиолета. С ростом дозы ультрафиолета влияние хлороформных и этилацетатных экстрактов лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* наиболее заметно в области высоких доз (> 6 мДж/см²).

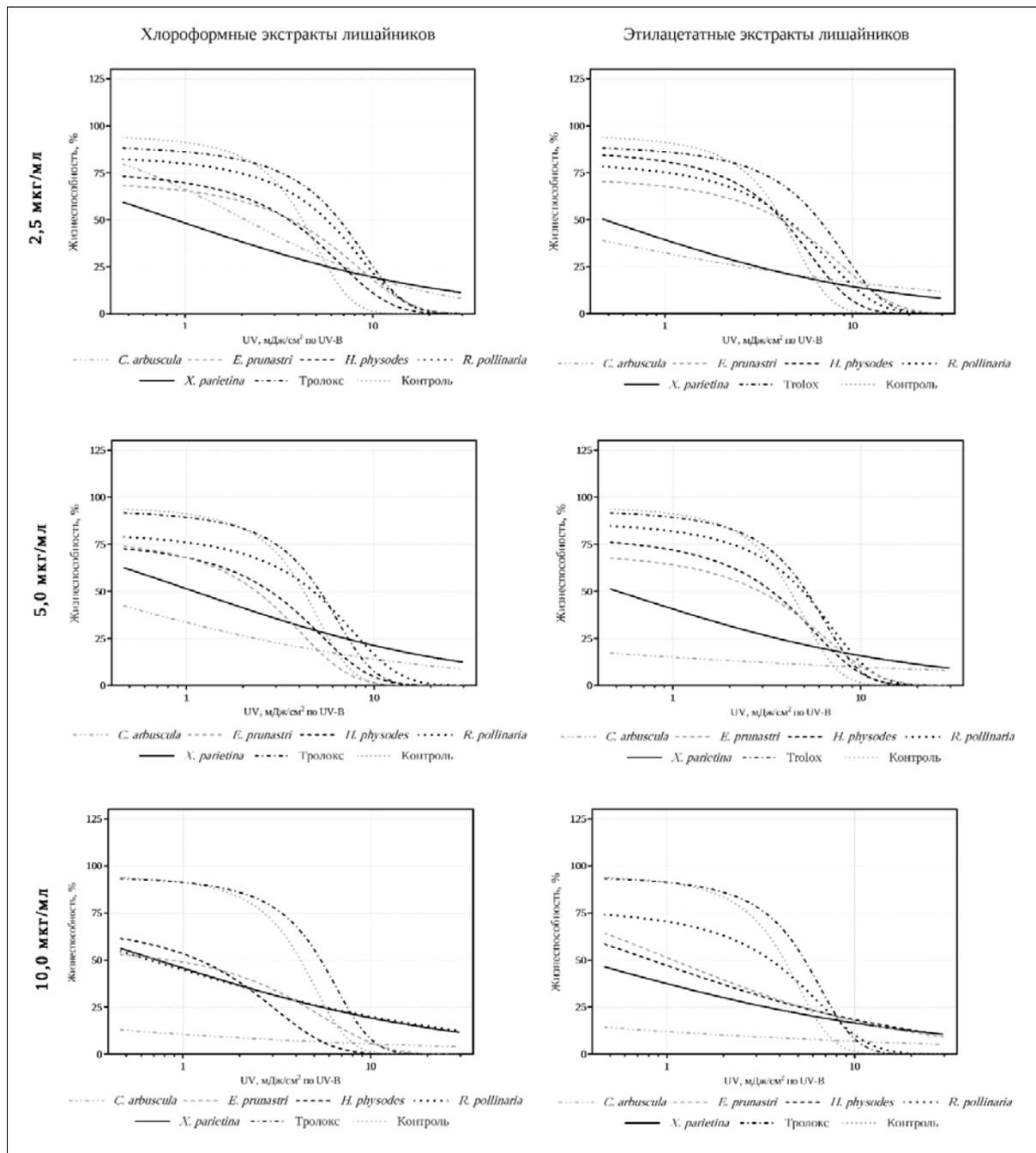


Рисунок 2 – Влияние доз ультрафиолета и экстрактов лишайников на жизнеспособность кератиноцитов человека (HaCAT)

Заключение. Выход хлороформных и этилацетатных из воздушно-сухой биомассы лишайников *C. arbuscula* и *X. parietina* составляет 3-4 %; из *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria* – около 10 %. Хлороформные и этилацетатные экстракты лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* не являются фотозащитными по показателям величин SPF и $\lambda_{\text{крит}}$.

Цитотоксичными для культур кератиноцитов человека линии HaCAT были хлороформные экстракты *C. arbuscula*, *H. physodes* и *X. parietina*; этилацетатные – *C. arbuscula*.

Хлороформный и этилацетатный экстракты *R. pollinaria* (2,5 ÷ 5,0 мкг/мл) проявляли слабые фотопротекторные свойства (ФИЦ = 1,3 ÷ 1,5). Хлороформные экстракты *E. prunastri* и *H. physodes* (2,5 мкг/мл) и этилацетатные экстракты *E. prunastri* (2,5 мкг/мл), *H. physodes* (2,5 ÷ 5,0 мкг/мл), *R. pollinaria* (10 мкг/мл) фотомодифицирующих свойств не проявляли. Все остальные растворы экстрактов проявляли фотосенсибилизирующие свойства, причем экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* усиливали поражающее действие ультрафиолета в 4 ÷ 95 раз.

При наращивании доз облучения культур кератиноцитов ультрафиолетом от нулевых до летальных значений с ростом концентраций экстрактов лишайников в питательной среде повышалась их фотосенсибилизирующая активность в области доз до $3 \div 6$ мДж/см².

Литература

1. Determination of genotoxic, antigenotoxic and cytotoxic potential of the extract from lichen *Cetraria aculeata* (Schreb.) Fr. in vitro / H. Zeytinoglu [et al.] // *Phytother Res.* – 2008. – Vol. 22. – P. 118–123.
2. 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.
3. Cytotoxic activity of physodic acid and acetone extract from *Hypogymnia physodes* against breast cancer cell lines / E. Studzińska-Sroka [et al.] // *Pharm Biol.* – 2016. – Vol. 54 (11). – P. 2480–2485.
4. Храмченкова, О. М. Фотозащитная активность экстрактов из пяти видов лишайников в отношении кератиноцитов человека (HaCAT) / О. М. Храмченкова, М. В. Матвеенков. – Журн. Бел. гос. ун-та. Экология. – 2018. – № 4. – С. 52–62.
5. Храмченкова, О. М. Цитотоксические и фотомодифицирующие свойства метанольных и ацетоновых экстрактов пяти видов лишайников / О. М. Храмченкова, М. В. Матвеенков // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины.* – 2020. – № 6 (123). – С. 92–98.
6. Manojlovic, N. T. Antimicrobial activity of extracts and various fractions of chloroform extract from the lichen *Laurera benguelensis* / N. T. Manojlovic, P. J. Vasiljevic, Z. S. Marković // *Journal of Biological Research-Thessaloniki.* – 2010. – Vol. 13. – P. 27–34.
7. Screening of antimicrobial activity and cytotoxic effects of two *Cladonia* species / B. Açikgöz [et al.] // *Z Naturforsch.* – 2013. – Vol. 68 c. – P. 191–197.
8. The isolation, analytical characterization by HPLC–UV and NMR spectroscopy, cytotoxic and antioxidant activities of baecomycetic acid from *Thamnolia vermicularis* var. *subuliformis* / N. T. Manojlović [et al.] // *Hem. ind.* – 2011. – Vol. 65 (5). – P. 591–598.
9. *Platismatia glauca* and *Pseudevernia furfuracea* lichens as sources of antioxidant, antimicrobial and antibiofilm agents / T. Mitrović [et al.] // *EXCLI Journal.* – 2014. – Vol. 13. – P. 938–953.
10. Храмченкова, О. М. Цитотоксическая активность ацетоновых экстрактов из лишайников в отношении линии кератиноцитов человека HaCAT / О. М. Храмченкова, М. В. Матвеенков // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины.* – 2018. – № 3 (108). – С. 81–86.
11. American Type Culture Collection [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.atcc.org>. – Access date: 18.08.2018.
12. 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.
13. In vitro cytotoxic activity of Thai medicinal plants used traditionally to treat cancer / A. Itharat [et al.] // *Journal of ethnopharmacology.* – 2004. – Vol. 90 (1). – P. 33–38.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Институт радиобиологии
НАН Беларуси

Поступила в редакцию 19.01.2021

Информатика

УДК 004.93

Разработка SDK для мобильного приложения с применением технологии дополненной реальности

Н.А. АКСЁНОВА, А.И. КУЧЕРОВ

В данной статье описывается разработка мобильного приложения, позволяющего дополнить архитектурный проект застройщика трёхмерными интерактивными моделями и инфографикой. Основной задачей данной разработки является создание библиотеки программных утилит (BluePrint SDK) для мобильного приложения, способного отображать трёхмерный план здания в дополненной реальности. Приложение, созданное с помощью этой библиотеки, будет устанавливаться на мобильное устройство и, когда специальная метка дополненной реальности попадает в объектив, приложение отображает трёхмерную модель здания поверх этой метки.

Ключевые слова: мобильное приложение, дополненная реальность, визуализация, маркеры, трекинг, Android приложение.

The development of a mobile application that allows you to complement the architectural project of the developer with three-dimensional interactive models and infographics is described. The main task of this development is to create a library of software utilities (BluePrint SDK) for a mobile application capable of displaying a three-dimensional building plan in augmented reality. The application created with this library will be installed on a mobile device and when a special augmented reality tag hits the object-glass, the application displays a three-dimensional model of the building on top of this tag.

Keywords: mobile application, augmented reality, visualization, markers, tracking, Android application.

Введение. Целью исследования является поиск подходящих технологий для реализации библиотеки компонентов, а также поиск автоматизации процесса применения технологии дополненной реальности.

Разрабатываемое мобильное приложение может использоваться в деятельности предприятий-застройщиков и позволит демонстрировать номенклатуру продукции с привязкой её к статичным изображениям каталога продукции. Использование технологии дополненной реальности – это новый способ представления материала, позволяющий преобразить существующие архитектурные проекты в наглядные интерактивные модели за счет использования цифровых прототипов. Данная визуализация обеспечивает интерес и вовлеченность заказчика в архитектурные проекты, способствует росту конкурентно-способности данных предприятий.

Создание интерактивной системы визуализации с применением технологии дополненной реальности может обеспечить цифровую трансформацию строительной и архитектурной отраслей. Учитывая современные информационные технологии и их возможности, этот подход со временем станет только более актуальным [1]. Не только то, что технологии дополненной реальности совершенствуются с каждым годом, но и то, что с моделями в дополненной реальности гораздо проще взаимодействовать на мобильных устройствах, чем если бы они были простыми трёхмерными моделями. Приложения дополненной реальности переводят движение управляемого устройства в движение камеры в виртуальном пространстве. В результате эта технология может заметно расширить целевую аудиторию за счет повышения доступности и инноваций.

Структура проекта. Структура проекта отображается в виде набора файлов и инструкций по их использованию. Для того чтобы реализовать простую в использовании и обслуживании архитектуру, при планировании архитектуры следует использовать принцип разделения задач. Это позволит пользователям этой библиотеки использовать только необходимые им функции, что также соответствует принципу единой ответственности.

Правильный подход к этой проблеме состоял бы в разделении подразумеваемого рабочего процесса на неделимые фазы, выборе фаз, поддерживаемых SDK Blueprint, и создании соответствующих подпапок для каждой фазы (рисунок 1).

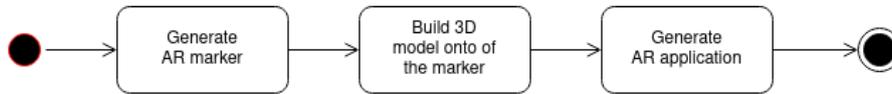


Рисунок 1 – Рабочий процесс для использования SDK

Учитывая этот рабочий процесс, предпочтительная структура проекта может быть представлена в виде набора взаимодействующих слоев. Входные данные для SDK Blueprint – это просто изображение, содержащее маркер дополненной реальности. SDK должен быть способен извлекать метку дополненной реальности из цифровых или печатных изображений, если они соответствуют набору требований: изображение не должно быть искажено или размыто, границы должны быть четко видны, маркер должен представлять высококонтрастное и детализированное изображение. Схема слоев проекта показана на рисунке 2:

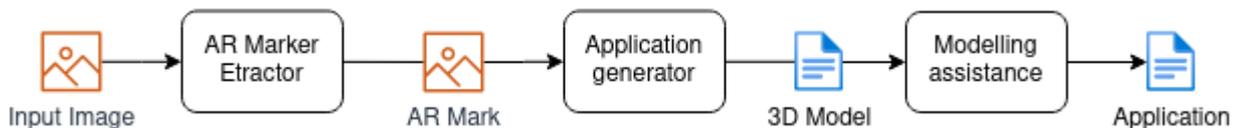


Рисунок 2 – Структура проекта, представленная в виде слоёв

Каждый шаг в подразумеваемом рабочем процессе также будет генерировать некоторые файлы. Что касается первого этапа «Создание маркера AR», то будут созданы изображения. Эти изображения должны иметь высокое разрешение, без артефактов сжатия. Форматы файлов PNG лучше всего соответствуют этим требованиям. Несмотря на это, программа должна быть способна импортировать другие форматы изображений, такие как JPG, TIFF или GIF.

Фаза 3D-моделирования должна завершиться экспортом файла 3D-модели. Формат файла OBJ является нейтральным тяжеловесом в области 3D-печати. Сам файл отображается в виде текстового файла со списком вершин и их координатами, списком граней и ребер, соединенных этими вершинами, как показано на рисунке 3.

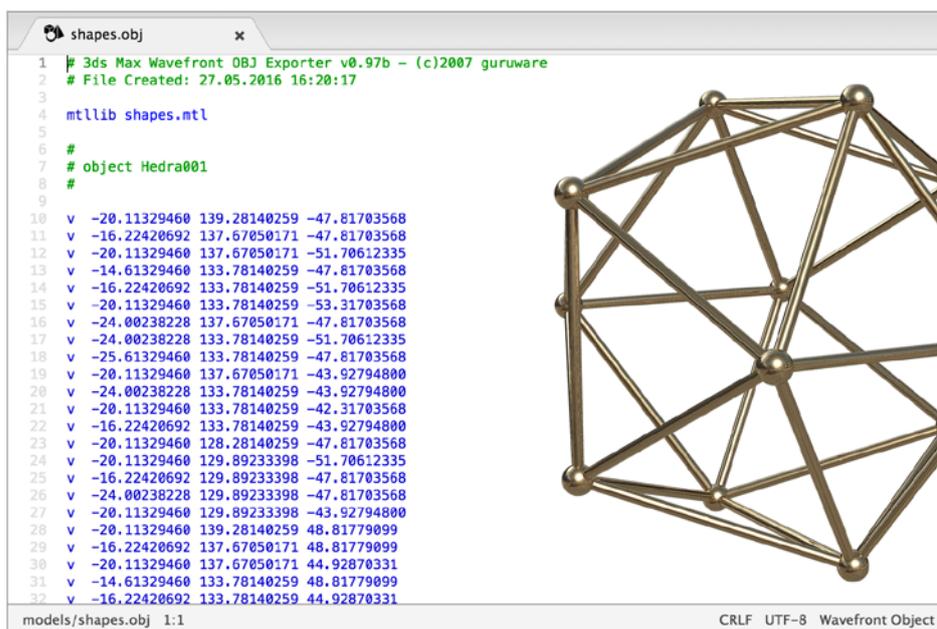


Рисунок 3 – Пример формата файла OBJ

Формат файла OBJ поддерживает как приблизительное, так и точное кодирование геометрии поверхности. При использовании приблизительной кодировки она не ограничивает сетку поверхности треугольными гранями. Если пользователь хочет, он может использовать полигоны, такие как четырехугольники.

Каждая подпапка должна содержать текстовый файл с инструкциями по использованию. Корень библиотеки также должен содержать текстовый файл, содержащий описание SDK, ожидаемый рабочий процесс, модули SDK и краткое описание каждого из этих модулей. Учитывая подразумеваемый рабочий процесс, будет использоваться следующая структура проекта. Каждая подпапка должна содержать узнаваемую структуру: исходный каталог, содержащий исходный код модуля SDK, каталог двоичных файлов, содержащий исполняемые двоичные файлы, предварительно скомпилированные для использования из коробки, и текстовый файл инструкций.

В системе определены две роли: поставщик и пользователь. Поставщик – это тот, кто использует SDK BluePrint для создания пользовательского AR-приложения. Пользователь – это человек, который устанавливает приложение на свое устройство для последующего использования.

Поставщик может быть вовлечен в один из следующих сценариев:

- извлечение AR-метки из цифрового или печатного изображения;
- создание трехмерной модели на основе AR-mark с помощью программного обеспечения;
- использование набора инструкций для создания нужного приложения.

Пользователь, загрузивший приложение, имеет следующие сценарии:

- просмотр желаемой 3D-модели (включает наведение камеры на маркер)
- изменение конфигурацию модели.

Библиотека программных компонентов включает в себя:

- программную утилиту «ar-mark-extractor» для создания метки дополненной реальности по фотографии;
- программную утилиту «build-form» построения трехмерной модели;
- набор инструкций и сценариев для помощи в разработке приложений.

Описание основных модулей. Модуль «ar-mark-extractor» представляет собой программу, позволяющую пользователю генерировать маркер дополненной реальности, который будет использован мобильным приложением. Для разработки программной утилиты извлечения метки использован алгоритм контурного анализа компьютерного зрения, который позволяет преобразовывать загруженное изображение в метку дополненной реальности. Поскольку, в качестве входных изображений используются план-схемы проектно-сметной документации, выбор контурного анализа для считывания данных является наиболее эффективным.

Контурный анализ использует в своей структуре метод описания, хранения, сравнения и поиска графических объектов по их контурам. Рассмотрение только контуров в качестве меток дополненной реальности позволяет упростить считываемое изображение до пространства контуров, что существенно снижает сложность алгоритмов и вычислений. Увеличение объема обрабатываемых данных и изоляция контента между точкой его захвата и сервером обработки требует внедрения адаптивной настройки инкапсуляции данных при передаче через публичную сеть [2].

Поставщик приложения запускает программу «ar-mark-extractor» и загружает изображение, которое необходимо преобразовать в маркер дополненной реальности. Программа пытается определить углы нужного маркера и отобразить рамку обрезки поверх изображения. Поставщик настраивает кадр, при необходимости программа обрезает изображение. После этого пользователь должен переместить ползунки яркости и контрастности, чтобы получить четкое, легко узнаваемое изображение (рисунок 4).

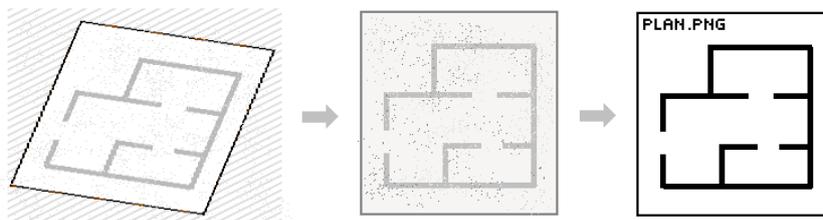


Рисунок 4 – Этапы создание маркеров дополненной реальности для BluePrint SDK

Программная утилита «build-form» построения трехмерных моделей реализована для Blender 3D и представляет собой скрипт, написанный на Python. Данная утилита является дополнительным модулем, с помощью которого в Blender импортируются изображения-метки, на которых точками помечаются все найденные узлы (рисунок 5).

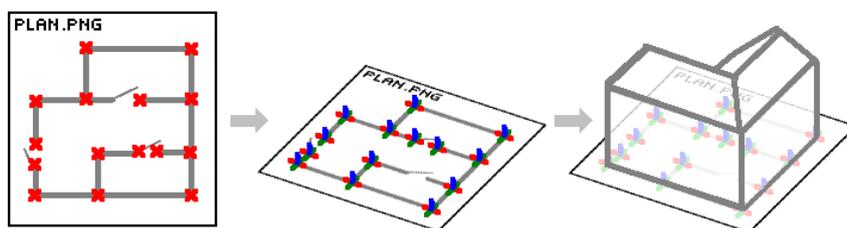


Рисунок 5 – Отображение найденных узлов для построения 3D-модели

При выполнении скрипта в консоли Blender, в рабочую область будет импортировано изображение с точками, указывающими на углы на этом изображении. Если включить привязку курсора к объектам, то на их основе можно очень быстро построить 3D модель [3].

Заключение. В результате проведенных исследований разработаны и созданы подходящие технологии для реализации библиотеки компонентов, рассмотрена возможность автоматизации процесса создания маркеров дополненной реальности и построения трехмерных моделей. Основной функцией разработанного BluePrint SDK является помощь в создании приложений дополненной реальности. Сгенерированное приложение будет иметь минимальный набор функций, который определяет набор возможных сценариев по умолчанию.

Литература

1. Демиденко, О. М. Принципы формализации вычислительного процесса в ЛВС / О. М. Демиденко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2017. – № 6 (105). – С. 75–78.
2. Воруев, А. В. Инкапсуляция магистрального трафика центра обработки данных / А. В. Воруев, О. М. Демиденко, В. Д. Левчук, П. Л. Четет // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 1 (34). – С. 88–93.
3. Брюс, Э. Практическая статистика для специалистов Data Science / Э. Брюс, П. Брюс. – СПб. : Питер, 2019. – 1022 с.

Повышение эффективности обнаружения объектов небольших размеров на 8K изображениях при использовании сверточных нейронных сетей

Р.П. БОГУШ¹, С.В. АБЛАМЕЙКО^{2,3}, С.А. ИГНАТЬЕВА¹, Е.Р. АДАМОВСКИЙ¹

Рассмотрено применение методики обнаружения объектов на изображениях формата 8K, которая предполагает пирамидальное представление изображения и блочную обработку с перекрытием на каждом уровне с использованием сверточной нейронной сети (СНС). В качестве СНС при обработке блоков применяется YOLOv4. Представлен анализ архитектуры данной СНС и описаны основные особенности, которые позволяют обеспечивать высокую результативность ее работы. Для проведения экспериментов по оценке эффективности предложенного подхода подготовлена база данных с размеченными объектами на изображениях формата 8K двух классов «человек» и «транспортное средство». Для оценки качества работы вычислялась величина mAP для различных сочетаний таких параметров, как степень пороговой уверенности YOLOv4 и процент взаимного пересечения блоков при иерархическом представлении 8K изображения. Приведены результаты исследований.

Ключевые слова: блочная обработка, многомасштабное представление изображения, детектирование объектов, архитектура YOLOv4.

The application of the method of object detection in 8K images, which assumes a pyramidal representation of the image and block processing with overlap at each level using a convolutional neural network (CNN) is considered. YOLOv4 is used as a CNN for blocks processing. The analysis of the architecture of this SNS is presented and the main features are described that allow ensuring high efficiency of its work. To conduct experiments to assess the effectiveness of the proposed approach, a database with marked objects in 8K images of two classes «person» and «vehicle» was prepared.

To assess the quality of work, the mAP value was calculated for various combinations of such parameters as the degree of threshold confidence YOLOv4 and the percentage of mutual intersection of blocks in the hierarchical representation of an 8K image. Experimental results are presented.

Keywords: block processing, multi-scale image representation, object detection, YOLOv4 architecture.

Введение. Непрерывное развитие видеокamer приводит к повышению качества получаемых цифровых изображений и видеопоследовательностей, в том числе и за счет увеличения разрешения. В последнее время достаточно широко используется формат 4K, развитие которого предполагает увеличения размеров изображений до 8K. В этом случае размер большей стороны, как правило, горизонтальной, составляет около 8000 пикселей. Соответственно, на таких изображениях в системах компьютерного зрения предоставляется возможность более точного обнаружения объектов, в том числе и небольших размеров. В настоящее время для детектирования объектов применяются сверточные нейронные сети, которые обладают наилучшей обобщающей способностью среди известных методов и позволяют наиболее эффективно решать задачу автоматического обнаружения и локализации объектов. Однако возможность их практического применения в значительной мере определяется аппаратными средствами, а именно такими основными характеристиками графических процессоров, как быстродействие и доступный объем памяти. В связи с этим на первом шаге обработки с использованием СНС размеры изображения формата 8K будут значительно уменьшены, что приведет к потере информативности и уменьшению точности обнаружения объектов малых размеров. Данная статья посвящена решению задачи повышения эффективности обнаружения объектов небольших размеров на изображениях формата 8K при использовании СНС.

Теоретический анализ. Повышение точности обнаружения объектов небольших размеров на изображениях с высоким разрешением рассматривается во многих работах, но наиболее эффективными являются алгоритмы, предполагающие блочное разбиение изображения и применении СНС для каждого блока при обработке изображений формата 4K [1], [2]. При этом результативность детектирования объектов в значительной степени определяется приемами объединения результатов обнаружения фрагментов объектов на границах блоков и применяе-

мой СНС. Среди существующих эффективной является методика обнаружения объектов на основе их пирамидально блочной обработки с использованием СНС YOLOv3, результативность которой на 4К изображениях показана в [1]. Однако YOLOv3 хотя и обладает достаточно высокой точностью, скорость работы значительно медленнее по сравнению с предыдущими версиями данной СНС. Поэтому для обработки 8К изображений, имеющих значительно большие размеры по сравнению с 4К, желательно использовать СНС, требующую меньших временных затрат, но не ухудшающую точность обнаружения. Для такой задачи перспективной является новая архитектура СНС YOLOv4, которая направлена на увеличение скорости работы и оптимизацию параллельных вычислений [3]. Общая схема YOLOv4 представлена на рисунке 1.

Структуру YOLOv4 можно разделить на три основных блока: блок извлечения признаков, который служит для выявления характерных особенностей объектов на входном изображении; блок сбора карт признаков с разных слоев, который собирает и передает карты признаков с различных уровней нейронной сети на блок обнаружения и классификации, который, в свою очередь, формирует выходные карты признаков, для разных масштабов, что позволяет предсказывать координаты ограничительных рамок искомым объектам и классифицировать содержимое каждой ячейки на входном изображении. На рисунке 1а блок извлечения признаков представляет собой СНС CSPDarknet-53, в основе которой находится Darknet-53, состоящая из 53 сверточных слоев. Отличие заключается в использовании межэтапных соединений (CSP – Cross-Stage-Partial connection) [4] для снижения вычислительной сложности. На рисунке 1б представлена структура блока с CSP-соединением. В данном блоке карты признаков разделяются на две части, одна из них проходит через группу Res-блоков (Residual blocks), другая поступает на сверточный слой, после чего выходные данные объединяются. Res-блоки представлены в группах по 1, 2, 4 или 8 блоков (рисунк 1с), каждый из которых состоит из сверточных слоев 1×1 и 3×3 с замыкающим соединением (shortcut connection) (рисунк 1д). Использование такого соединения обеспечивает альтернативный путь для градиента, что приводит к лучшей сходимости модели. Другим отличием CSPDarknet-53 является использование функции активации Mish [5], которая представляет собой комбинацию из функции идентичности, гиперболического тангенса, softplus и характеризуется достаточно низкой вычислительной сложностью и определяется как:

$$f(x) = x \tanh(\text{softplus}(x)) = x \tanh(\ln(1 + e^x)).$$

Кроме этого, Mish является немонотонной, гладкой и непрерывной функцией, неограниченной сверху, но ограниченной снизу. Отсутствие верхней границы позволяет избегать насыщения, которое может приводить к замедлению обучения, а значит позволяет ускорить процесс обучения. Наличие нижней границы обеспечивает эффект регуляризации. Немонотонность сохраняет небольшие отрицательные значения, что стабилизирует градиентный поток, а гладкость и непрерывность эффективны при обобщении и оптимизации результатов.

Блок сбора карт признаков с разных слоев включает модифицированный модуль SPP (SPP-Spatial Pyramid Pooling) (рисунк 1е) для увеличения рецептивного поля и модифицированный модуль PAN для создания пирамиды признаков [6]. Первый из них выполняет опера-

цию maxpool по картам признаков $\frac{N}{32} \times \frac{N}{32} \times 255$ с разным размером ядра $k = \{1, 5, 9, 13\}$, но

идентичным заполнением, которое используется для сохранения пространственного размера. Затем четыре комплекта соответствующих карт признаков объединяются в один, размером

$\frac{N}{32} \times \frac{N}{32} \times 2048$. Это увеличивает область анализа, улучшая таким образом точность модели,

при этом без существенных вычислительных затрат.

Для агрегирования характеристик объектов в YOLOv4 используется модифицированная версия PAN (Path Aggregation Networks), использующая пирамиды признаков, которые служат для объединения карт признаков нижних и верхних уровней сети [7], то есть сочетают семантическую информацию с верхних уровней и более точную с нижних. В этой модификации PAN вместо операции суммирования результатов соседних слоев, используется конкатенации, что позволяет увеличить точность прогнозов.

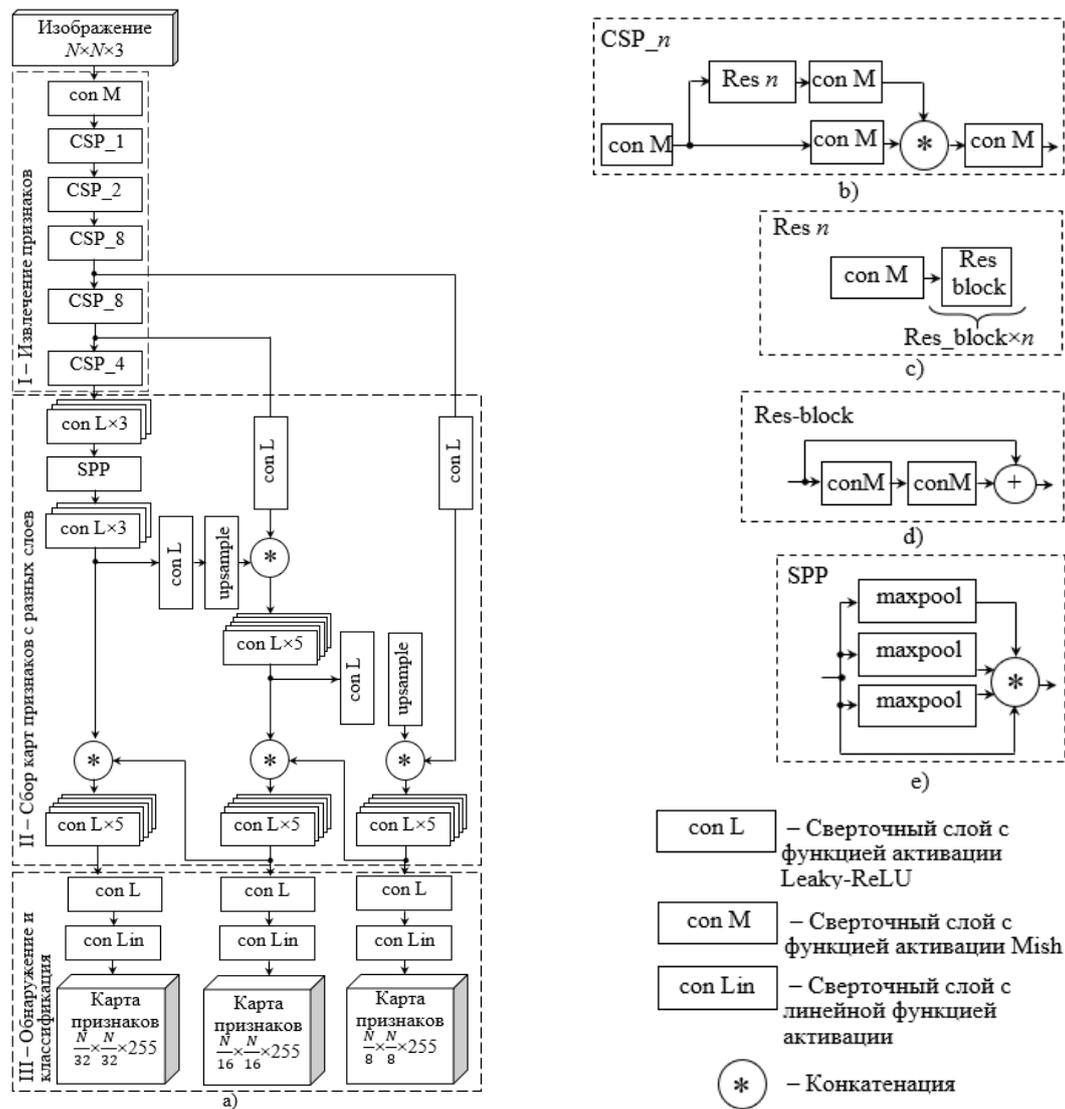


Рисунок 1 – Архитектура YOLOv4: а) общая схема; б) структура блока с CSP-соединением; в) объединение n Res-блоков; д) структура Res-блока; е) блок SPP

Блок обнаружения и классификации используется для нахождения ограничительной рамки и классификации содержимого в каждой ячейке. Изображение размером $N \times N \times 3$, подаваемое на вход нейронной сети, разделяется на $S \times S$ ячеек – которые представляют собой область интереса (RoI – region of interest). Количество ячеек прямо пропорционально размеру входного изображения и обратно пропорционально шагу дискретизации на каждом из масштабов. Карты признаков на выходе сети YOLOv4 используют шаги дискретизации 32, 16 и 8, которые показывают во сколько раз уменьшился размер выходного слоя относительно входного изображения. В YOLOv4 к каждой ячейке сетки для предсказания координат и размеров рамки, ограничивающей объект на изображении, используются три заранее заданных anchor-рамки, которые представляют собой прямоугольники различных размеров с разным соотношением сторон. Вектор признаков включает 85 параметров для anchor-рамки, включая смещение координат t_x и t_y , и отклонения размеров t_w и t_h , на основании которых формируется предсказанная рамка (рисунок 2), вероятность обнаружения объекта и вероятности принадлежности объекта к каждому из 80 классов. Тогда вектор признаков для каждой ячейки изображения с учетом трех anchor-рамок будет равен $1 \times 1 \times 255$. Предсказанная рамка описывается 85 параметрами, включая вероятность ее правильного определения (P_c), координаты центра (b_x и b_y), высоту и ширину (b_h и b_w) и вероятности нахождения объекта одного из 80 классов ($c_1 \dots c_{80}$). Класс объекта, ограниченного предсказанной рамкой, определяется с использованием $c_1 \dots c_{80}$ и сигмоидальной функции.

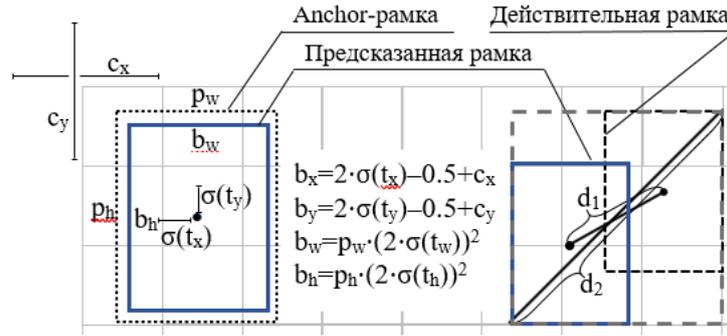


Рисунок 2 – Построение ограничительных рамок при обнаружении объектов: c_x, c_y – координаты верхней левой ячейки; p_h и p_w – размеры anchor-рамки; b_w, b_h, b_x, b_y – координаты центра и размеры предсказанной ограничительной рамки; $\sigma(t)$ – функция сигмоиды; t_x, t_y, t_w, t_h – отклонение координат и размеров предсказанной рамки; d_1 – евклидово расстояние между центральными точками действительной и предсказанной рамки; d_2 – диагональ прямоугольника, охватывающего две рамки

Для определения положения ограничительных рамок применяется функция потерь L_{CloU} [8]:

$$L_{CloU} = 1 - IoU + \frac{d_1^2}{d_2^2} + \alpha v,$$

где IoU – отношение между пересечением и объединением предсказанной и действительной рамок, и для расчета площадь пересечения делится на площадь объединения; d_1 – евклидово расстояние между центральными точками предполагаемой и действительной ограничительными рамками; d_2 – диагональ минимальной рамки, которая описывает предсказанную и действительную; α – параметр, зависящий от взаимного расположения предсказанной и действительной рамки, определяется как:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{если } IoU < 0,5; \\ \frac{v}{(1 - IoU) + v}, & \text{если } IoU \geq 0,5; \end{cases}$$

$$v = \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \arctan \frac{w}{h} \right)^2$$

– мера согласованности сторон ограничительных рамок.

При расчете потерь учитывается площадь перекрытия, расстояние между центральными точками и соотношение сторон. L_{CloU} позволяет увеличить площадь перекрытия действительной и предсказанной ограничительной рамки, минимизировать расстояние между центральными точками и сохранить постоянное соотношение сторон. L_{CloU} обеспечивает лучшую скорость и точность в задаче приближения координат предсказанной ограничительной рамки к действительной по сравнению с L_{DloU} (Distance-IoU loss) и L_{GloU} (Generalized-IoU loss) потерями.

Подавление немаксимумов (NMS) применяется для обработки ситуации, когда для одного и того же объекта предсказано несколько рамок с высокими вероятностями соответствия. В YOLOv4 используется подход на основе greedy NMS, которая следует гипотезе о том, что обнаруженные предполагаемые рамки с большим количеством перекрытий соответствуют одному и тому же объекту. При этом рамки-кандидаты сортируются по степени достоверности классификации и на основе IoU удаляются дублирующие.

Методика проведения эксперимента. Для проведения экспериментов использована методика (рисунок 3), которая предполагает для каждого изображения следующие этапы: инициализация СНС; пирамидальное представления изображения в виде его копий с уменьшающимся масштабом (для 8K изображений число слоев пирамиды равно 4); блочное разбиение слоев пирамиды с перекрытием; обнаружение объектов в каждом блоке; объединение результатов на границах блоков; вычисление IOU для обнаруженных объектов и предварительно размеченных на входном изображении и если полученное значение IOU > 0,5 и объекты принадлежат одному классу, то объект считается обнаруженным.

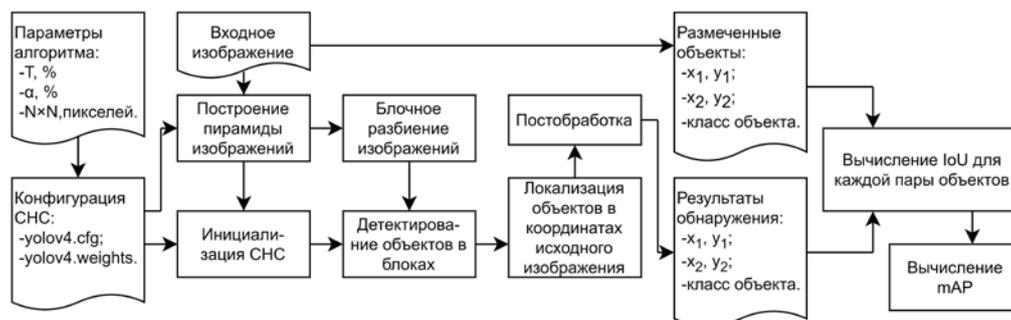


Рисунок 3 – Схема методики эксперимента

В качестве объектов использованы «человек» и «транспортное средство», причем во второй класс включены такие, как «автобус», «машина» и «грузовик». Алгоритм обнаружения объектов на 8К изображениях написан на языке Python 3.7 с использованием технологии CUDA, которая применяется для пакетной обработки блоков на основе СНС, что позволяет значительно уменьшить временные затраты. В качестве СНС использована реализация YOLOv4 на фреймворке PyTorch [9], применены файлы весовых коэффициентов yolov4.weights [10] и конфигурации yolov4.cfg, а также набор из 120 изображений формата 8К [11]–[13], на которых было размечено 4200 объектов, наименьший из них размером 38×10 . Таблица 1 содержит результаты определения mAP для различных сочетаний параметров степени пороговой уверенности T СНС и процента взаимного пересечения блоков α при пирамидальном разбиении изображения.

Таблица 1 – Оценка mAP с использованием пирамидально-блочной обработки 8К изображений

		$\alpha, \%$								
		15	20	25	30	35	40	45	50	55
$T, \%$	60	0,5759	0,5651	0,5638	0,5727	0,5299	0,5527	0,5305	0,5616	0,5333
	65	0,5802	0,5720	0,5806	0,5812	0,5515	0,5761	0,5577	0,5676	0,5534
	70	0,5781	0,5825	0,5905	0,6087	0,5621	0,5994	0,5703	0,5841	0,5609
	75	0,5795	0,5876	0,5973	0,5948	0,5656	0,5808	0,5836	0,5835	0,5817
	85	0,5738	0,5620	0,5679	0,5765	0,5739	0,5711	0,5624	0,5664	0,5632

На рисунке 4а представлена уменьшенная копия видеоизображения формата 8К [14], а на рисунках 4b и 4с отображены результаты обнаружения объектов для его правой верхней части на основе СНС YOLOv4 и на основе предлагаемой методики.



Рисунок 4 – Примеры обнаружения объектов на 8К изображении: а) уменьшенная копия исходного изображения; б) на основе СНС YOLOv4; в) на основе предложенной методики

Из таблицы 1 следует, что при заданных условиях наиболее оптимальным является сочетание параметров $T = 70\%$, $\alpha = 30\%$, для которых получено наибольшее результирующее значение $mAP_{\max} = 0,6087$, при этом размер наименьшего обнаруженного объекта 39×17 . При использовании YOLOv4 со входным слоем 1024×1024 для $T = 70\%$ $mAP = 0,295$, размер наименьшего обнаруженного объекта 44×27 . Таким образом, предложенный подход на используемой базе данных 8K изображений позволяет обнаруживать объекты меньших размеров и увеличить результативность обнаружения более чем в два раза.

С использованием СНС YOLOv4 на изображении (рисунок 4b) обнаружено 50 объектов, с минимальным размером 319×124 пикселей, а с применением рассмотренной методики найдено 132 объекта (рисунок 4c), размер минимального из них 42×36 пикселей. Кроме этого, достоинством предложенной методики для 8K изображений является то, что она позволяет существенно повысить результативность обнаружения при близком расположении множества объектов с их перекрытием. В этом случае признаки объектов будут в значительной мере отличны от полученных в результате обучения СНС, а дальнейшее уменьшение изображения формата 8K к размерам входного слоя еще в большей мере уменьшает информативность таких объектов. Применяемая методика, использующая блочную и иерархическую обработку, позволяет сохранить исходные признаки каждого объекта и обеспечить их правильное обнаружение. На рисунке 5 показаны примеры детектирования близко расположенных людей на 8K изображении.



Рисунок 5 – Результаты обнаружения: а) на основе СНС YOLOv4; б) на основе рассмотренной методики

Применение СНС YOLOv4 позволило обнаружить одного человека размером 235×110 (рисунок 5a), представленный подход обеспечил обнаружение 210 объектов, минимальный размер 41×21 (рисунок 5b).

Заключение. Представлен подход для повышения точности обнаружения объектов небольших размеров на 8K изображениях при применении СНС. На основе проведенного анализа для такой задачи предложено использовать YOLOv4. Рассмотрены особенности архитектуры данной СНС. Показано, что применение предлагаемой методики детектирования объектов на изображениях формата 8K на основе их пирамидального представления и блочной обработки с перекрытием на каждом уровне обеспечивает увеличение mAP на подготовленной базе 8K изображений более, чем в два раза для объектов небольших размеров. Предложенная методика более эффективна при близком расположении объектов с перекрытием на 8K изображении.

Литература

1. Богуш, Р. П. Обнаружение объектов на изображениях с большим разрешением на основе их пирамидально-блочной обработки / Р. П. Богуш, И. Ю. Захарова, С. В. Абламейко // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 7–16.
2. Ruzicka, V. Fast and accurate object detection in high resolution 4K and 8K video using GPUs / V. Ruzicka, F. Franchetti // IEEE High Performance Extreme Computing Conference, Waltham, 25–27 Sept. 2018. – Waltham, 2018. – P. 1–7.
3. Bochkovskiy, A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Electronic resource] / A. Bochkovskiy, C. Wang, H. Liao // ArXiv. – Mode of access : <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf>. – Date of access : 12.03.2021.

4. Wang, C. CSPNet: A New Backbone that can Enhance Learning Capability of CNN / C. Wang [et. al.] // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Seattle, 14–19 June 2020. – Seattle, 2020. – P. 1571–1580.
5. Misra, D. Mish: A Self Regularized Non-Monotonic Activation Function [Electronic resource] / D. Misra // ArXiv. – Mode of access : <https://arxiv.org/vc/arxiv/papers/1908/1908.08681v2.pdf>. – Date of access : 12.03.2021.
6. Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition / K. He [et. al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, iss. 9. – P. 1904–1916.
7. Path Aggregation Network for Instance Segmentation/ S. Liu [et. al.] // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, 18–23 June 2018, Salt Lake City, 2018. – P. 8759–8768.
8. Distance-IoU Loss: Faster and Better Learning for Bounding Box Regression [Electronic resource] / Z. Zheng [et. al.] // ArXiv. – Mode of access : <https://arxiv.org/pdf/1911.08287.pdf>. – Date of access : 12.03.2021.
9. Pytorch-YOLOv4 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://github.com/Tianxiaomo/pytorch-YOLOv4>. – Date of access : 16.02.2021.
10. Yolov4.weights [Electronic resource]. – Mode of access : https://drive.google.com/u/0/open?id=1cewMfusmPjYWbrnuJRuKhPMwRe_b9PaT. – Date of access : 16.02.2021.
11. New York City 8K – VR 360 Drive [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.youtube.com/watch?v=2Lq86MKesG4>. – Date of access : 18.03.2021.
12. Walk in Shinjuku, Tokyo, Japan @8K 360° VR / Sep 2020 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.youtube.com/watch?v=YYQufxYrBiU>. – Date of access : 18.03.2021.
13. Лондон, Великобритания. Виртуальное путешествие. 360 видео в 8К [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.youtube.com/watch?v=KGerjHMa90s>. – Дата доступа : 18.03.2021.
14. Magic of Hong Kong. Mind-blowing cyberpunk drone video of the craziest Asia’s city by Time-lab.pro [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.youtube.com/watch?v=gYO1uk7vIcc>. – Date of access : 18.03.2021.

¹Полоцкий государственный университет

²Белорусский государственный университет

³Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Поступила в редакцию 16.04.2021

Информационная емкость объектов в сопряжении с дополненной реальностью

А.В. ВОРУЕВ

В тексте излагается идея использования изменения информационной емкости объекта дополненной реальности в режиме просмотра и/или взаимодействия. Разделение состояний объекта предлагается связывать с формой его восприятия наблюдателем с активной точки обзора. Практическая значимость предлагаемого подхода увязывается с необходимостью реализации множественности вариантов восприятия справочных данных об объекте пользователями разных языковых групп.

Ключевые слова: экспозиция, точка обзора, виртуальное пространство, дополненная реальность.

The idea of using a change in the information capacity of an augmented reality object in viewing or interaction mode is described. The separation of the states of the object is proposed to be connected with the form of its perception by the observer from the active point of view. The practical significance of the proposed approach is linked to the need to implement a plurality of options for perceiving reference data about an object by users of different language groups.

Keywords: exposure, point of view, virtual space, augmented reality.

Введение. Применение в качестве маркера дополненной реальности, к которому привязывается отображение дополненных данных, обычно трактует однозначность формирования картинка, а следовательно, единственную плоскость наблюдения. Геометрические отклонения регламентированы, и это затрудняет привязку к объекту реальной природы, в том числе рукотворному объекту. Например, при подготовке официальных церемоний открытия/закрытия WorldSkills International 2019 в Казани для использования такого маркера была построена перевернутая пирамида (рисунок 1).



Рисунок 1 – Монтаж сцены для мероприятий WorldSkills International 2019

Для программной компенсации искажения геометрии объекта при обзоре каждому из зрителей было рекомендовано указать сектор, ряд и место своего билета. Созданная программа не только рассчитывала допустимую форму маркера, но и моделировала положение пользователя в пространстве, чтобы обеспечить его уникальной точкой обзора при формировании «обогащенной» картинки на мобильном устройстве (рисунок 2).

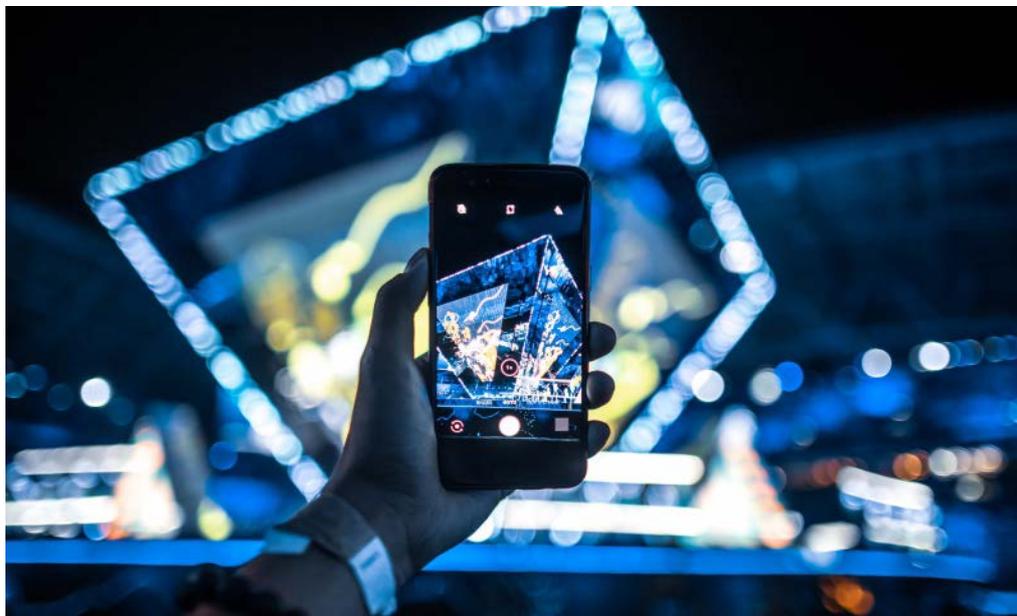


Рисунок 2 – Просмотр объекта-маркера в активном состоянии

Таким образом, промышленное применение объекта дополненной реальности предполагает не сведение точки обзора к единственной экспозиции, а активную адаптацию текущей проекции маркера.

Управление точкой обзора для изменения вида объекта. Исходя из вышеизложенного, кроме варианта решения «о единстве объекта с разных точек обзора и, как следствие, единстве информации, которую следует получить пользователю» можно перейти к другому варианту - «множественность точек обзора единственного объекта можно трактовать как множество объектов, информационные свойства которых могут не совпадать». В этом случае можно ввести понятие информационной емкости объекта в сопряжении с дополненной реальностью. В простейшем случае информационная емкость равна числу возможных точек обзора, гарантирующих однозначное распознавание проекции объекта. В качестве частного отклонения от этого значения можно описать применение симметричных объектов, проекции которых с нескольких точек обзора могут быть одинаковы.

Поскольку потенциальный зритель нуждается в руководстве по работе с системой на местности, необходимо разместить условную систему координат (рисунок 3).

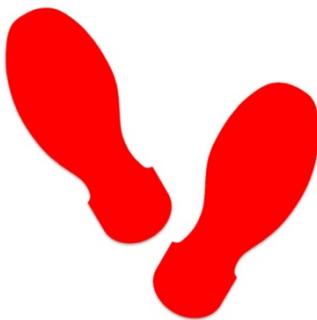


Рисунок 3 – Пример возможной инфоточки для пользователя дополненной реальности

При расчете информационной емкости 3D-объектов следует учитывать свойство симметрии при восприятии контура и определить входит ли в оценку восприятия объекта цветовая характеристика (и/или анализ детализированной текстуры поверхностей объекта).

Пример анализа объекта типа «куб» с тремя инфоточками (рисунок 4) дает нам два разных значения характеристики информационной емкости маркера.

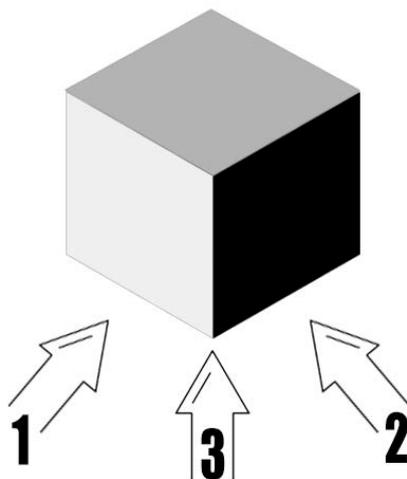


Рисунок 4 – Свойства информационной емкости симметричного 3D-объекта

Если система анализа объекта дополненной реальности базируется на распознавании контуров, то инфоточки с номерами 1 и 2 совпадают по полученным результатам опознавания объекта, на инфоточке точка 3 контур объекта имеет другую форму. Информационная емкость маркера имеет значение два.

Если система анализа объекта дополненной реальности, кроме распознавания контуров, определяет цветовой тон поверхности - ситуация меняется. Инфоточки с номерами 1 и 2 совпадают по полученным результатам опознавания контура, но поверхность имеет различие по цвету. На инфоточке точка 3 контур объекта имеет другую форму, цветовосприятие фиксирует наличие цветового сочетания. Информационная емкость маркера имеет значение три.

Если анализируемый объект обеспечивает разницу в распознавании контуров для всех трех инфоточек, его информационная емкость маркера будет иметь значение три для обоих вариантов работы системы анализа.

Результаты работы системы анализа могут зависеть еще и от динамического изменения освещенности самого объекта и/или его окружения (рисунок 5).

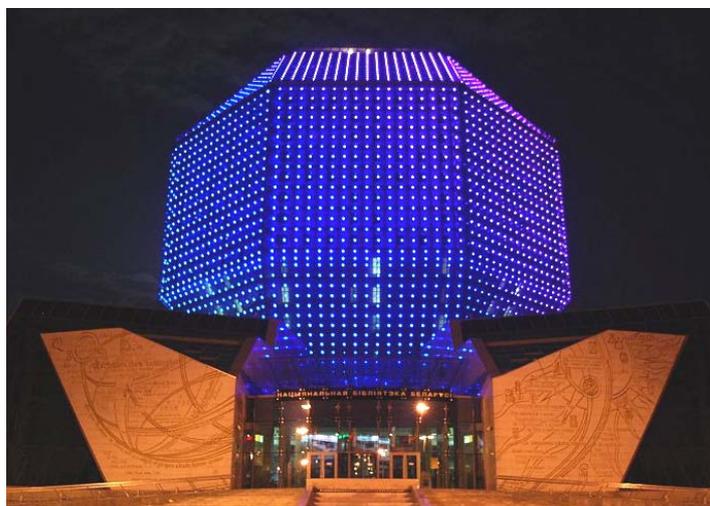


Рисунок 5 – Национальная библиотека Беларуси в режиме управляемой подсветки

Если закономерность искажения контуров и цвета поверхностей объекта отсутствует, его информационная емкость в дополненной реальности может быть приравнена к нулю.

Манипуляция внешним видом объекта для изменения его свойств

Мотивация перемещения пользователя для взаимодействия с запрограммированными объектами хорошо представлена в проекте «Superliminal» (рисунок 6), где для перемещения между комнатами виртуального пространства игрок находится в постоянном поиске места экспозиции и требований по изменению восприятия перспективы обзора, масштаба объекта и его функциональных свойств.



Рисунок 6 – Динамическое пространство Superliminal

В представленном на рисунке 6 примере объект «коробка» остается объектом того же типа и допускает запрограммированное взаимодействие с любой точки обзора. Объект «пешка», который в текущей экспозиции является рисунком текстуры помещения, становится самостоятельным объектом с запрограммированным набором взаимодействий только после перемещения оператора в точку обзора, где внешний вид объекта не имеет геометрических отклонений от эталона.

В таком случае информационная емкость маркера изменяется от нуля к единице и обратно. Множественность свойств объекта связана с множественностью его форм [1].

Заключение. Примером практического применения маркеров дополненной реальности с увеличенной информационной емкостью может стать художественная галерея с виртуальным аудиогидом. Язык представления материала аудиогuida будет ассоциирован с позицией точки обзора в момент активации функции. Если язык представления материала пользователя не устраивает, достаточно будет сделать шаг или два в сторону от текущей позиции.

Литература

1. Максимей, И. В. Проблемы теории и практики моделирования сложных систем / И. В. Максимей, О. М. Демиденко, В. Д. Смородин. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 253 с. – ISBN 978-985-577-011-5.

Методика оценки экономической надежности ИТ предприятия на основе нейронных сетей

А.В. КЛИМЕНКО¹, М.В. ЯЦКОВЕЦ¹, Ю.С. КАРАСЬ²

В статье рассматривается актуальность повышения экономической надежности ИТ предприятия. Предлагается подход к повышению экономической надежности используя ИНС, которая основана на объединении байесовской структуры и метода усреднения модели в единую структуру.

Ключевые слова: экономическая надежность, методы оценки надежности, устойчивость, категория устойчивости.

The relevance of improving the economic reliability of an IT enterprise is considered. An approach to improving economic reliability using ANN is proposed, which is based on combining the Bayesian structure and the averaging method of the model into a single structure.

Keywords: economic reliability, methods of assessing reliability, sustainability, sustainability category.

Введение. В настоящее время численные модели все чаще используются для анализа и прогнозирования производительности сложных критических систем. В то же время практикующие инженеры обеспокоены неопределенностью, которая присуща этим системам. Как следствие, в последние десятилетия большое внимание уделяется вероятностному анализу, такому как анализ экономической надежности и оптимизация надежности. Однако вычислительные затраты, необходимые для выполнения вышеупомянутых анализов, зависят от нескольких факторов, таких как: численная модель, представляющая систему, тип анализа и обработка неопределенностей (т. е. алеаторная и/или эпистемическая неопределенность) [1, с. 113]. В контексте анализа экономической надежности распространение неопределенностей параметров от входов модели к выходам осуществляется с помощью подходов, основанных на моделировании методом Монте-Карло. Эти подходы моделирования включают в себя: Монте-Карло (МК) [2, с. 85] и продвинутое МК, такие как: выборка важности, направленная выборка, линейная выборка, моделирование подмножеств и т. д. Хотя передовые методы МК очень эффективны, вычислительные затраты, необходимые для выполнения анализа экономической надежности ИТ предприятия, являются дорогостоящими. Популярной стратегией снижения вычислительных затрат является замена реальной модели суррогатной моделью, такой как искусственная нейронная сеть (ИНС). ИНС может быть построена на основе нескольких наборов данных из базовой интересующей модели. С другой стороны, использование ИНС приводит к возникновению неопределенности при выборе модели, а также к отклонениям в оценке экономической надежности ИТ предприятия. На самом деле, ИНС с определенной архитектурой, многократно обученная конечному набору данных $D_i(x, y)$ приводит к различным исполняющим ИНС, функции затрат которых захватываются в разных локальных минимумах пространства решений функций затрат. Это явление возникает в результате случайной инициализации весов внутри каждой ИНС. Следовательно, общепринятой практикой является выбор наилучшей ИНС из неопределенного набора на основе производительности на независимом наборе валидации и сохранение только сети с наименьшей ошибкой валидации и отбрасывание остальных. Однако у такого подхода есть два недостатка. Во-первых, все усилия, необходимые для обучения остальных сетей, тратятся впустую. Во-вторых, производительность обобщения сетей на проверочном наборе имеет случайную составляющую из-за шума на данных, поэтому сеть, которая имела самую низкую ошибку на проверочном наборе, может плохо работать на новом тестовом наборе. Эти недостатки можно преодолеть, объединив сети вместе, чтобы позволит значительно повысить надежность прогнозируемой величины. Таким образом, в данной работе предложен подход к повышению экономической

надежности ИТ предприятия на основе нейронной сети используя для прогнозирования вероятности отказа p_F . Рассматривается теория анализа надежности с использованием имитационного подхода и нейросетевого моделирования для повышения надежности.

Определение проблемы. Анализ экономической надежности. Функция предельного состояния может быть просто определена как детерминированное отображение из z -мерного входного пространства в одномерное выходное пространство:

$$G: x \in D_x \subset R_z \rightarrow y = G(x) \in R,$$

где x – z -мерные переменные состояния, а y – переменная производительности. $G(x)$ указывает, соответствует ли реализация $x \in D_x$ безопасному состоянию ($G(x) > 0$) или состоянию отказа ($G(x) \leq 0$). В контексте теории вероятностей, вероятность отказа p_F определяется как вероятность того, что реализация $x \in D_x$ соответствует состоянию отказа в терминах функции предельного состояния $G(x)$

$$p_F = P(G(x) \leq 0) = \int_{D_f} f_x(x) dx,$$

где $D_f = \{x \in D_x : G(x) \leq 0\}$ – область отказа, а $f_x(x)$ – функция плотности вероятности состояния переменных X . Поскольку уравнение аналитически неразрешимо в силу своей многомерности, моделирование методом Монте-Карло позволяет численно вычислить оценку вероятности отказа p_F учетом большой выборки размера N :

$$\widehat{p}_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{G(x) \leq 0}(x_i),$$

где $I_{G(x) \leq 0}$ – индикаторная функция отказа, такая что $I = 1$ для $G(x) \leq 0$ $I = 0$ в противном случае.

Моделирование искусственной нейронной сети для оценки экономической надежности ИТ предприятия. Недостатком использования моделирования методом Монте-Карло для вычисления оценки p_F является большое количество оценок модели, необходимых для вычисления оценки экономической надежности ИТ предприятия. Следовательно, вместо предельной функции состояния можно использовать ИНС для снижения вычислительных затрат. Для построения ИНС требуется набор реальных пар входных/выходных данных $D_i(x, y)$ размера N_i , генерируемых в соответствии с моделью сигнал плюс шум $y = \mu(x) + \varepsilon$, где y – наблюдаемая производительность, генерируемая из модели, x – независимые переменные состояния, отобранные из плотности вероятности $\Omega(x)$ ε – независимый, идентично распределенный шум, отобранный из плотности $\Psi(\varepsilon)$ (не обязательно гауссовой), имеющей среднее значение 0 и дисперсию σ^2 и $\mu(x)$ – неизвестная функция, которая должна быть аппроксимирована путем нахождения аппроксимации $\widehat{\mu}(x)$ из $D_i(x, y)$. Можно сделать первые предположения о функциональной форме $\mu(x)$. Однако, поскольку класс параметрических функций обычно неизвестен, необходимо прибегнуть к непараметрическому регрессионному подходу. Используя непараметрический подход, можно построить оценку $\widehat{\mu}(x)$ из большого класса функций Υ , которые, как известно, обладают хорошими аппроксимационными свойствами. Класс аппроксимационных функций обычно содержит набор оценок $f(w, x) \subset \Upsilon$, для которых элементы каждого подкласса $f(w, x)$ непрерывно параметризуются набором p весов w^α ; $\alpha = 1, 2, \dots, p$. Алгоритм градиентной декомпозиции, который используется для минимизации функции стоимости J нейронной сети, определяется как:

$$J = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

найдя набор весов w^a такой, что для любого заданного входного сигнала функция затрат достаточно мала. Однако ограничением градиентного алгоритма обучения ИНС является возможность того, что функция затрат будет захвачена локальным минимумом, тем самым снижая прогностическую способность сети.

Предлагаемый подход. Данный подход направлен на повышение надежности прогноза экономической надежности ИТ предприятия при использовании ИНС. Основная идея предлагаемого подхода заключается в построении набора ИНС с одинаковой архитектурой и на основе одного и того же набора обучающих данных $D_t(x, y)$. Таким образом, создается распределение идентичных ИНС, имеющих свои функции ошибок, захваченные в различных локальных минимумах. Основной идеей этого подхода является то, что пространство решений функции ошибки эксплуатируется как можно больше раз с возможностью нахождения глобальных минимумов на поверхности ошибки. Далее используется теорема Байеса для оценки апостериорной вероятности каждой из обученных ИНС, на основе вероятности можно предсказать обучающие данные. За этим следует использование метода усреднения модели (подход корректирующего фактора [3, с. 3]) для объединения общего прогноза, сделанного всеми ИНС в наборе, чтобы получить надежный прогноз, сходящийся к истинному значению. Наконец, неопределенность модели, распространяющаяся на прогнозируемую величину, количественно определяется в терминах доверительных интервалов.

Выбор модели Байеса для построения нейронной сети. Учитывая множество M идентичных (т. е. одну и ту же структуру модели) конкурирующих ИНС $N_k, k=1, 2, \dots, M$, обученных с одним и тем же набором данных $D_t(x, y)$, теорема Байеса может быть использована для выражения апостериорной вероятности k -й ИНС в множестве, которое определяется:

$$P(N_k | D_t) = \frac{P(D_t(x, y) | N_k) P(N_k)}{\sum_{q=1}^M P(D_t(x, y) | N_q) P(N_q)},$$

где $P(D_t(x, y) | N_k)$ – вероятность обучающих данных $D_t(x, y)$ для N_k ИНС, а $P(N_k)$ – априорная вероятность N_k , которая представляет собой вероятность ИНС, оцененную перед наблюдением обучающих данных $D_t(x, y)$. Априорная вероятность ИНС может быть задана в зависимости от существующих априорных знаний о достоверности ИНС N_k , или она может быть задана как равномерная вероятность, $P(N_k) = 1/M$, если дополнительная информация не предоставляется. Преимущество присвоения равномерной априорной вероятности состоит в том, что избегается трудность численной оценки априорной вероятности. Вероятность $P(D_t(x, y) | N_k)$ можно рассматривать как вероятность наблюдения обучающих данных. Это обеспечивает относительную меру того, насколько хорошо ИНС поддерживается обучающими данными. Поскольку знаменатель в уравнении является общим для всех ИНС, то апостериорная вероятность ИНС пропорциональна априорной вероятности. Вероятность каждой ИНС оценивается путем измерения степени согласия между обучающими данными и ответом \hat{y} для каждой ИНС. Следовательно, можно описать вероятностную связь между обучающими данными и предсказаниями ИНС, включающими неопределенность. Как правило, функция смещения и шум включаются как части вероятностной зависимости для сопоставления прогнозов ИНС с обучающими данными. Функция смещения фиксирует расхождения между ответами дорогостоящей модели и прогнозами, сделанными ИНС. Шум обычно считается независимой и тождественно распределенной нормальной случайной величиной со средним значением, равным нулю [1, с. 231].

Прогноз искусственной нейронной сети. Чтобы получить прогноз экономической надежности ИТ предприятия от ИНС, оценки, сделанные всеми последующими обученными

ИНС, объединяются с использованием метода усреднения модели. В частности, подход корректирующего фактора [3, с. 5], представляющий собой метод усреднения модели, сочетается с теоремой Байеса. Таким образом, ИНС, имеющая наибольшую апостериорную вероятность, используется в сочетании с другими соответствующими ИНС, обученными корректировать оценку смещения, предсказанную единственной ИНС. Корректирующий коэффициент A_f оценивается путем предположения, что ошибка между предсказанием всех последующих обученных ИНС и обучающими данными распределена нормально. Предсказание надежности ИНС может быть получено из следующего уравнения:

$$y_{над.} = \widehat{y}^* + A_f,$$

где \widehat{y}^* представляет собой точечную оценку наилучшего ИНС в множестве, характеризующемся наибольшей вероятностью, а $y_{над.}$ представляет собой предсказание экономической надежности ИТ предприятия, включающее неопределенность модели. Поскольку корректирующий фактор A_f предполагается нормальным распределением, ожидаемое значение и дисперсия корректирующего фактора A_f задаются следующими соотношениями:

$$E(A_f) = \sum_{k=1}^M P(N_k | D_t) (\widehat{y}_k - \widehat{y}^*).$$

Аналогично, ожидаемое значение и дисперсия прогноза экономической надежности $y_{над.}$ могут быть оценены из следующих соотношений:

$$E(y_{над.}) = \widehat{y}^* + E(A_f),$$

где $E(A_f)$ $Var(A_f)$ представляют ожидаемое значение и дисперсию корректирующего коэффициента, а $E(y_{над.})$ $Var(y_{над.})$ представляют ожидаемое значение и дисперсию оценки экономической надежности ИТ предприятия.

Доверительный интервал для оценки экономической надежности. Для количественной оценки неопределенности в прогнозировании экономической надежности ИТ предприятия $y_{над.}$ из-за неопределенности модели устанавливаются доверительные интервалы. В частности, 5-й и 95-й процент прогноза надежности используются для количественной оценки неопределенности модели. Теоретически этот интервал, вероятно, содержит истинное оценочное значение. Поскольку предполагается, что неопределенность модели следует нормальному распределению, доверительные интервалы вычисляются из следующих уравнений [4, с. 247]:

$$\overline{CI} = E(y_{над.}) + z^* \sqrt{Var(y_{над.})},$$

где \overline{CI} и \underline{CI} представляют верхний и нижний доверительные интервалы робастной оценки, а z^* – верхнее критическое значение гауссовского распределения, количественно определяющего неопределенность модели.

Заключение. Анализ надежности сложных моделей с использованием имитационного подхода является вычислительно дорогостоящим из-за большого количества оценок моделей, необходимых для вычисления экономической надежности ИТ предприятия. В этой статье ИНС используется в качестве замены дорогостоящей модели для облегчения вычислительных ограничений. Использование ИНС для такого рода анализа вносит дополнительные смещения и дисперсии (то есть неопределенности) в прогнозируемую величину. Использование метода перекрестной валидации для выбора наилучшей ИНС из набора ИНС с идентичной архитектурой вводит смещение и снижает надежность прогнозируемой величины. Поэтому был представлен новый подход для повышения точности прогноза (т. е. надежности), сделанного ИНС, и количественной оценки неопределенностей модели в терминах доверительных интервалов. Предложенный подход объединяет байесовский метод выбора модели и метод усреднения модели в единую структуру. Хотя вычислительные усилия, необходимые для реализации предлагаемого подхода, являются дорогостоящими, стратегии распараллеливания могут быть приняты для уменьшения этих усилий.

Литература

1. Грязнова, А. Г. Экономическая теория : учеб. пособие / А. Г. Грязнова, В. М. Соколинский. – М. : Кнорус, 2014. – 464 с.
2. Соболев, И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука-Москва, 2012. – 191 с.
3. Nilsen, T. Models and model uncertainty in the context of risk analysis / T. Nilsen, T. Aven. – Norway : Stavanger University College, 2003. – 10 p.
4. Wonnacott, T. H. Introductory statistics / T. H. Wonnacott, R. J. Wonnacott. – New York : Wiley, 1990. – 736 p.

¹Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

²Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 15.04.2021

УДК 512.542

О некоторых свойствах A -допустимых подгрупп конечных групп

Р.В. БОРОДИЧ, М.В. СЕЛЬКИН, Е.Н. БОРОДИЧ, Т.В. БОРОДИЧ, А.В. БУЗЛАНОВ

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.

The structure of the subgroup equal to the intersection of the kernels maximal A -admissible subgroups that do not contain an \mathfrak{F} -residual, with restrictions on the indices is studied. The properties of the corresponding generalized Frattini subgroup are established.

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

В данной работе изучается влияние свойств \mathfrak{F} -абнормальных максимальных подгрупп заданного индекса на формационное строение конечных групп. Необходимые определения и обозначения можно найти в работах [1]–[3]. В дальнейшем π – некоторое множество простых чисел, все рассматриваемые классы групп содержат единичные группы.

В настоящее время развитие теории пересечений максимальных подгрупп связано с введением функторного метода [3], позволяющего строить новые обобщения подгруппы Фраттини и исследовать влияние свойств этих подгрупп на строение группы.

Данная работа посвящена продолжению исследований, опубликованных в работах [4]–[9].

Пусть P – множество всех простых чисел. Если $p \in P$ и $\pi \subseteq P$, то $\pi' = P \setminus \pi$; $p' = P \setminus \{p\}$. Подгруппа H группы G называется S_π -подгруппой, если $|G : H|$ не делится на числа из π .

Через $O_\pi(G)$ обозначают наибольшую нормальную π -подгруппу группы G .

Напомним, что классом групп называют всякое множество групп, содержащее вместе с каждой своей группой G и все группы, изоморфные 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) $f(1) = \mathfrak{G}$.

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 .

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

Пусть \mathfrak{X} – непустая формация, тогда максимальная подгруппа M группы G называется \mathfrak{X} -нормальной (\mathfrak{X} -абнормальной), если $G^{\mathfrak{X}}$ содержится (соответственно не содержится) в

M , где $G^{\mathfrak{X}}$ – \mathfrak{X} -корадикал группы G , т. е. пересечение всех тех нормальных подгрупп N группы G , для которых $G/N \in \mathfrak{X}$.

Класс групп \mathfrak{F}^* называется подпрямым замыканием формаций \mathfrak{H} и \mathfrak{F} , если из $G \in \mathfrak{F}^*$ следует, что $G^{\mathfrak{F}^*} \subseteq G^{\mathfrak{H}} \cap G^{\mathfrak{F}}$.

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

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

Несложно заметить, что так как операторы действуют как соответствующие им автоморфизмы, то каждая характеристическая подгруппа является A -допустимой для произвольной группы операторов.

Заметим, 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 $MG^{\mathfrak{F}} = G$.

Обозначим через $\Phi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ пересечение всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих \mathfrak{F} -корадикал. Через $\Phi_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$ ($\Phi_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$) пересечение всех тех \mathfrak{F} -абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих \mathfrak{F} -корадикал, индекс каждой из которых не является (является) π -числом, где \mathfrak{F} – формация. В случае отсутствия в группе G указанных подгрупп, полагаем указанные подгруппы равными группе G .

Лемма 1 [5]. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор, $K \subseteq N \triangleleft G$, $K \triangleleft G$, N – A -допустимая подгруппа группы G и $K \subseteq \Phi_{\theta}(G, A)$. Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) если N/K π -замкнута, то и N π -замкнута;
- 2) $O_{p'}(N/K) = O_{p'}(N)/K$.

Теорема 1. Пусть группа G имеет группу операторов A , такую, что $(|G|, |A|) = 1$, Γ – формация. Если в группе G существуют максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие Γ -корадикал, не принадлежащие Γ , то пересечение всех таких подгрупп совпадает с $\Phi_{\circ}^{\Gamma}(G, A)$.

Доказательство. Предположим, что пересечение $\overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A)$ всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих Γ -корадикал, и не принадлежащих формации Γ , совпадает с подгруппой $\Phi(G, A)$. Так как

$$\Phi(G, A) \leq \Phi^{\Gamma}(G, A) \leq \overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A),$$

то $\Phi^{\Gamma}(G, A) = \overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A)$.

Пусть $\overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A)$ не совпадает с подгруппой $\Phi(G, A)$. Тогда $G = M \overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A)$, где M – некоторая максимальная A -допустимая подгруппа группы G . Если $M \in \Gamma$, то $G/\overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A) \in \Gamma$. Отсюда $\overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A)$ содержится в максимальных A -допустимых подгруппах, содержащих Γ -корадикал, что невозможно. Поэтому M не входит в Γ и является максимальной A -допустимой подгруппой, содержащей Γ -корадикал. Итак, всякая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая $\overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A)$, содержит Γ -корадикал. Следовательно, $\overline{\Phi}^{\Gamma}(G, A) \leq \Phi^{\Gamma}(G, A)$. Теорема доказана.

Теорема 2. Пусть группа G имеет группу операторов A , такую, что $(|G|, |A|) = 1$, \mathfrak{F} – формация. Если всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не содержащая \mathfrak{F} -корадикал, индекс которой в G есть π -число, принадлежит формации Γ , то выполняется одно из следующих условий:

$$1) G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A);$$

$$2) G^{\Gamma} \subseteq \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A);$$

$$3) G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A) \text{ – главный фактор группы } G, \pi(G^{\Gamma}) = \pi(G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)), \Phi_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A), \text{ причем } \Phi^{\Gamma}(G, A) = \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A), \text{ если } \Phi^{\Gamma}(G) \neq \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A).$$

Доказательство. Пусть G – группа наименьшего порядка, для которой теорема не выполняется. Если в группе G отсутствуют максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие \mathfrak{F} -корадикал, индекс каждой из которых в G есть π -число, то $\Phi_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = G$ по определению. Следовательно, $G^{\mathfrak{F}} \subseteq \Phi_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$, что противоречит предположению. Поэтому в дальнейшем считаем, что в группе G существует по крайней мере одна максимальная A -допустимая подгруппа M группы G , не содержащая \mathfrak{F} -корадикал, индекс которой в G есть π -число. Значит, $G = MG^{\mathfrak{F}}$. По условию теоремы $M \in \Gamma$. Значит, $G / G^{\mathfrak{F}} \in \Gamma$. Следовательно, $G^{\Gamma} \subseteq G^{\mathfrak{F}}$.

Если в группе G отсутствуют максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие Γ -корадикал, индекс каждой из которых в G есть π -число, то $\Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A) = G$ и $G^{\Gamma} \subseteq \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$, что противоречит предположению. Поэтому в дальнейшем предполагаем, что в группе G существуют максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие Γ -корадикал, индекс каждой из которых в G есть π -число, т. е. $\Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A) \neq G$.

Если G^{Γ} – минимальная инвариантная в G подгруппа, то либо $G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A) = 1$, либо $G^{\Gamma} \subseteq \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$. Если $G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A) = 1$, то, проследив дальнейшее доказательство, можно сделать вывод, что теорема справедлива. Принадлежность же подгруппы G^{Γ} пересечению $\Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$ противоречит тому, что в группе G существует максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал, индекс которой в G есть π -число.

Пусть G^{Γ} не является минимальной нормальной в G подгруппой. Рассмотрим участок главного ряда группы G :

$$1 = K_1 \subset K_2 \subset \dots \subset K_n = G^{\Gamma}.$$

Если K_i не содержится в $\Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$, где $1 \leq i \leq n$, то в группе G будет существовать такая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал, индекс которой в G есть π -число, что $G = MK_i$. А так как $G^{\Gamma} \subseteq G^{\mathfrak{F}}$, то по условию все такие максимальные A -допустимые подгруппы принадлежат Γ . Значит, $G / K_i \in \Gamma$. Отсюда $G^{\Gamma} = K_i$. А это противоречит выбору подгруппы K_i . Следовательно, $K_i \subseteq \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$ и поэтому $G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$ – главный фактор группы G .

Пусть $\Phi^{\Gamma}(G, A) = \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$. Замечаем, что

$$\pi(G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)) \subseteq \pi(G^{\Gamma}).$$

Покажем теперь, что $\pi(G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi^{\Gamma}(G, A)) \subseteq \pi(G^{\Gamma})$. Предположим, что существует такое простое число p , делящее порядок G^{Γ} , которое не делит $|G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)|$. Известно, что $G^{\Gamma} \cap \Phi^{\Gamma}(G, A) \subseteq \Phi(G, A)$. Значит, $G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A) \subseteq \Phi(G, A)$. В этом случае можно считать, что $G^{\Gamma} / G^{\Gamma} \cap \Phi_{\pi}^{\Gamma}(G, A)$ – p -замкнутая и p' -замкнутая подгруппа. По лемме 1 получаем, что $G^{\Gamma} = G_p^{\Gamma} \times G_{p'}^{\Gamma}$. Подгруппа G_p^{Γ} будет инвариантной в группе G . Ввиду выбора под-

группа G_p^Γ содержится в $\Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Но тогда G_p^Γ не содержится в $\Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Следовательно, в группе G найдется такая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал, индекс которой в G есть π -число, что $G = MG_p^\Gamma$. Но $G^\Gamma \subseteq G^{\mathfrak{S}}$, значит, $G = MG^{\mathfrak{S}}$. А по условию теоремы $M \in \Gamma$. Значит, $G^\Gamma = G_p^\Gamma$, т. е. p не делит порядок G^Γ , что противоречит предположению.

Следовательно, не существует такого простого числа p , делящего $|G^\Gamma|$, которое не делило бы $G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Потому

$$\pi(G^\Gamma) \subseteq \pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A)).$$

Учитывая, что $\Phi_\pi^\Gamma(G, A) = \Phi^\Gamma(G, A)$. Следовательно,

$$\pi(G^\Gamma) = \pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi^\Gamma(G, A)).$$

В дальнейшем можно предположить, что $\Phi^\Gamma(G, A) \subset \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Поэтому в группе G найдется такая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал, что $G = H\Phi_\pi^\Gamma(G, A)$.

Если $H \in \Gamma$, то $G^\Gamma \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. А это противоречит тому, что в группе G существуют максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие Γ -корадикал. Значит, H не принадлежит Γ .

В группе G подгруппа $\Phi_\pi^\Gamma(G) \neq G$, так как индекс максимальной A -допустимой подгруппы H в G , не содержащей Γ -корадикал, есть не π -число.

Так как $G^\Gamma \subseteq G^{\mathfrak{S}}$, то всякая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал не содержит \mathfrak{S} -корадикал. Поэтому в группе G все максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие Γ -корадикал, индекс каждой из которых в G есть π -число, принадлежат Γ , и среди всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих Γ -корадикал, индекс каждой из которых в G есть не π -число, должны находиться все максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие Γ -корадикал, не принадлежащие Γ , т. е. $\Phi_\pi^\Gamma(G, A) \subseteq \overline{\Phi}^\Gamma(G, A)$. Так как в группе существует максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал, не принадлежащая Γ , то по теореме 1 имеем, что $\Phi^\Gamma(G, A) = \overline{\Phi}^\Gamma(G, A)$. Итак, получим, что $\Phi_\pi^\Gamma(G, A) \subseteq \Phi^\Gamma(G, A)$. Следовательно,

$$G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A) \subseteq G^\Gamma \cap \Phi^\Gamma(G, A) \subseteq \Phi(G, A)$$

и $\Phi_\pi^\Gamma(G, A) = \Phi^\Gamma(G, A)$.

Покажем теперь, что $\pi(G^\Gamma) = \pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A))$. Предположим, что существует такое простое число p , которое делит порядок G^Γ , но не делит $|G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A)|$. Так как $G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A) \subseteq \Phi(G, A)$, то по лемме 1 получаем, что $G^\Gamma = G_p^\Gamma \times G_p^\Gamma$. Ввиду выбора подгруппа G_p^Γ содержится в $\Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Следовательно, $G_p^\Gamma \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$, ибо в противном случае $G^\Gamma \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$, что противоречит существованию в группе G максимальной A -допустимой подгруппы, не содержащей Γ -корадикал, индекс которой в G не есть π -число. Замечаем, что $G_p^\Gamma \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A) = \Phi^\Gamma \subset \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Если бы $G_p^\Gamma \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$, то $G^\Gamma \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$, а это противоречит существованию в группе G максимальной A -допустимой подгруппы, не содержащей Γ -корадикал, индекс которой в G есть π -число. Значит, G_p^Γ не из $\Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. В группе G найдется такая максимальная A -допустимая подгруппа F , не содержащая Γ -корадикал, индекс которой в G есть π -число, что $G = FG_p^\Gamma$. А по условию теоремы все такие максимальные A -допустимые подгруппы принадлежат Γ . Значит, $G^\Gamma \subseteq G_p^\Gamma$, т. е. p не делит

$|G^\Gamma|$, что противоречит выбору p . Следовательно, $\pi(G^\Gamma) \subseteq \pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A))$. Очевидно, $\pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A) \subseteq \pi(G^\Gamma)$. Поэтому $\pi(G^\Gamma) = \pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi_\pi^\Gamma(G, A))$. Так как $\Phi_\pi^\Gamma(G, A) = \Phi^\Gamma(G, A)$, то $\pi(G^\Gamma) = \pi(G^\Gamma / G^\Gamma \cap \Phi^\Gamma(G, A))$.

Покажем теперь, что $\Phi_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) = \Phi_\pi^\Gamma(G)$. Так как всякая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая Γ -корадикал, не содержит \mathfrak{F} -корадикал, то $\Phi_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) \subseteq \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Предположим, что $\Phi_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) \subset \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Тогда в группе G найдется такая максимальная A -допустимая подгруппа L , не содержащая \mathfrak{F} -корадикал, индекс которой в G есть π -число, что $G = L\Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Но по условию L принадлежит Γ . Значит, $G / \Phi_\pi^\Gamma(G, A) \in \Gamma$, что противоречит существованию в группе G максимальных A -допустимых подгрупп, не содержащих Γ -корадикал, индекс каждой из которых в G есть π -число. Поэтому $\Phi_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) = \Phi_\pi^\Gamma(G, A)$. Теорема доказана.

Из данной теоремы в различных частных ситуациях следуют соответствующие результаты работ [10]–[13].

Теорема 3. Пусть группа G имеет группу операторов A , такую, что $(|G|, |A|) = 1$, \mathfrak{F}^* – подпрямое замыкание формаций \mathfrak{H} и \mathfrak{F} , являющееся локальной формацией. Если $G^{\mathfrak{F}^*}$ – π -разрешимая подгруппа и всякая максимальная A -допустимая подгруппа, не содержащая \mathfrak{H} -корадикал, индекс которой в G есть π -число, не содержит \mathfrak{F} -корадикал, то $G^{\mathfrak{F}^*}$ – π' -подгруппа.

Доказательство. Пусть G – контрпример минимального порядка. Проверим выполнимость условия теоремы для фактор-группы G/K . Пусть M/K – максимальная A -допустимая подгруппа из G/K , не содержащая \mathfrak{H} -корадикал, индекс которой в G есть π -число. Тогда $|G:M|$ – π -число и M – максимальная A -допустимая подгруппа в G , не содержащая \mathfrak{H} -корадикал. По условию теоремы максимальная A -допустимая подгруппа M не содержит \mathfrak{F} -корадикал. Получаем, что M/K есть максимальная A -допустимая подгруппа в G/K , не содержащая \mathfrak{F} -корадикал. Кроме того, $G^{\mathfrak{F}^*}K/K \simeq G^{\mathfrak{F}^*}/G^{\mathfrak{F}^*} \cap K$ – π -разрешимая подгруппа.

Пусть в группе G существует инвариантная π' -подгруппа $K \neq 1$. Тогда по предположению для фактор-группы G/K теорема выполняется. Следовательно, $G^{\mathfrak{F}^*}K/K$ – π' -подгруппа. Но тогда и $G^{\mathfrak{F}^*}$ есть π' -подгруппа, что противоречит предположению. Значит, в дальнейшем предполагаем, что в группе G не существует инвариантных π' -подгрупп, отличных от единицы. Если $G^{\mathfrak{F}^*} = 1$, то эту подгруппу можно считать π' -подгруппой.

Пусть N – минимальная инвариантная подгруппа из $G^{\mathfrak{F}^*}$, отличная от единицы. Так как $G^{\mathfrak{F}^*}$ – π -разрешимая подгруппа, то N есть p -подгруппа, где $p \in G$.

Если N не содержится в $\Phi^{\mathfrak{F}^*}(G, A)$, то в группе G найдется такая максимальная A -допустимая подгруппа H , не содержащая \mathfrak{F}^* -корадикал, что $G = HN$. Так как $G^{\mathfrak{F}^*} \subseteq G^{\mathfrak{F}} \cap G^{\mathfrak{H}}$, то H одновременно не содержит \mathfrak{H} -корадикал и \mathfrak{F} -корадикал. Но $|G:H|$ – π -число, и по условию теоремы максимальная A -допустимая подгруппа H не должна содержать \mathfrak{F} -корадикал, а это значит, что $G^{\mathfrak{F}} = 1$. Но тогда $G^{\mathfrak{F}^*} \subseteq G^{\mathfrak{F}} = 1$, что противоречит предположению. Значит, $N \subseteq \Phi^{\mathfrak{F}^*}(G, A)$. По предположению $G^{\mathfrak{F}^*}/N$ есть π' -подгруппа. Кроме того, имеем, что

$$G^{\mathfrak{F}^*}/N \cap \Phi^{G^{\mathfrak{F}^*}}(G, A) \mapsto G^{\mathfrak{F}^*}/G^{\mathfrak{F}^*} \cap \Phi(G, A)$$

– π' -подгруппа. По лемме 1 $G^{\mathfrak{F}^*} = G_\pi^{\mathfrak{F}^*} \times G_{\pi'}^{\mathfrak{F}^*}$. Если $N \neq G^{\mathfrak{F}^*}$, то $G_{\pi'}^{\mathfrak{F}^*} \neq 1$, что противоречит предположению. Следовательно, $G^{\mathfrak{F}^*} = N$. Но тогда $G^{\mathfrak{F}^*} \subseteq \Phi(G, A)$, а \mathfrak{F}^* – локальная формация. Поэтому $G \in \mathfrak{F}^*$ и $G^{\mathfrak{F}^*} = 1$, что противоречит предположению. Теорема доказана.

Теорема 4. Пусть группа G имеет группу операторов A , такую, что $(|G|, |A|) = 1$, \mathfrak{F}^* – подпрямое замыкание формаций \mathfrak{H} , \mathfrak{F} , являющееся локальной формацией. Если G^{δ^*} – π -подгруппа и всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не содержащая \mathfrak{H} -корадикал, индекс которой в G есть π -число, содержит \mathfrak{F} -корадикал, то $G \in G^{\delta^*}$.

Доказательство. Пусть G – контрпример минимального порядка. Если $G^{\delta^*} \subseteq \Phi(G, A)$, то $G \in \mathfrak{F}^*$, так как \mathfrak{F}^* – локальная формация. Значит, в дальнейшем предполагаем, что G^{δ^*} не содержится в $\Phi(G, A)$. Тогда в группе G найдется такая максимальная A -допустимая подгруппа M , что $G = MG^{\delta^*}$. Но так как \mathfrak{F}^* – подпрямое замыкание формаций \mathfrak{H} и \mathfrak{F} , то $G^{\delta^*} \subseteq G^{\mathfrak{H}} \cap G^{\mathfrak{F}}$. Следовательно, M не содержит и \mathfrak{H} -корадикал, и \mathfrak{F} -корадикал. Но $|G : M|$ – π -число. По условию теоремы A -допустимая подгруппа M должна содержать \mathfrak{F} -корадикал. А это возможно лишь в том случае, когда $G^{\mathfrak{F}} = 1$. Но тогда $G^{\delta^*} = 1$. Полученные противоречия доказывают теорему.

Если \mathfrak{H} – формация p' -групп, \mathfrak{F} – формация сверхразрешимых групп, тогда \mathfrak{F}^* принадлежит формации P -сверхразрешимых групп. Если же \mathfrak{H} – формация π' -групп, \mathfrak{F} – формация нильпотентных подгрупп, то \mathfrak{F}^* не входит в формацию π -разложимых групп. Поэтому из теоремы 4, в случае единичности группы операторов, следуют результаты работы [14].

Литература

1. Шеметков, Л. А. Формации конечных групп / Л. А. Шеметков. – М.: Наука, 1978. – 272 с.
2. Шеметков, Л. А. Конечные разрешимые группы / Л. А. Шеметков // Изв. АН СССР. Сер. Мат. – 1968. – Т. 32, № 3. – С. 577–589.
3. Селькин, М. В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М. В. Селькин. – Минск: Беларуская навука, 1997. – 144 с.
4. Бородич, Е. Н. О пересечении \mathfrak{F} -абнормальных максимальных Θ -подгрупп / Е. Н. Бородич, Р. В. Бородич // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2007. – № 3. – С. 47–52.
5. Бородич, Р. В. О пересечении максимальных подгрупп конечных групп / Р. В. Бородич // Укр. мат. журнал. – 2019. – Т. 71, № 11. – С. 1455–1465.
6. Borodich, R. V. A generalized Frattini subgroup / R. V. Borodich // Asian-European Journal of Mathematics. – 2020. – DOI: 10.1142/S1793557121500261.
7. Бородич, Р. В. Об \mathfrak{F} -достижимых подгруппах в группах с операторами / Р. В. Бородич, Е. Н. Бородич, М. В. Селькин // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 2 (23). – С. 33–39.
8. Бородич, Е. Н. О пересечении подгрупп в группах с операторами / Е. Н. Бородич, Р. В. Бородич, М. В. Селькин // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 1. – С. 54–62.
9. Бородич, Р. В. О пересечении абнормальных подгрупп, не содержащих \mathfrak{F} -корадикал / Р. В. Бородич, М. В. Селькин // Известия. – 2019. – № 6 (117). – С. 117–125.
10. Белоногов, В. А. Конечные группы с единственным классом максимальных инвариантных подгрупп / В. А. Белоногов // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. – 1969. – № 3. – С. 114–117.
11. Русаков, С. А. О группах с максимальными подгруппами данного вида / С. А. Русаков // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. – 1968. – № 1. – С. 49–53.
12. Шлык, В. В. О влиянии формационных свойств максимальных подгрупп на строение конечной разрешимой группы / В. В. Шлык // ДАН БССР. – 1973. – Т. 17, № 2. – С. 109–112.
13. Rose, J. S. The influence on a finite group of its proper abnormal structure / J. S. Rose. – J. London Math. Soc. – 1965. – V. 40. – P. 348–361.
14. Сучков, В. К. О максимальных π -критических подгруппах конечной группы / В. К. Сучков // Изв. вузов. Сер. Математика. – 1968. – № 1. – С. 98–107.

Несимметричная локальная сеть двойное маркерное кольцо

В.В. БУРАКОВСКИЙ

Рассматривается несимметричная локальная сеть двойное маркерное кольцо с конечным числом N абонентских станций, на каждой из которых имеется односторонний буфер. Потоки поступающих сообщений предполагаются пуассоновскими, независимыми, интенсивности λ_i для i -ой станции, $1 \leq i \leq N$. Получены матрично-векторная система уравнений, позволяющая вычислить стационарные вероятности, а также основные вероятностно-временные характеристики рассматриваемой локальной сети.

Ключевые слова: локальная сеть двойное маркерное кольцо, станция, сообщение, односторонний буфер, ординарная дисциплина обслуживания, стационарные вероятности состояний.

An asymmetric local area network with a double token ring with a finite number of N subscriber stations each of which has a single buffer is considered. The flows of incoming messages are assumed to be Poisson, independent, with intensity λ_i for the i -th station, $1 \leq i \leq N$. A matrix-vector system of equations is obtained that allows calculating stationary probabilities, as well as the main probabilistic-time characteristics of the local network under consideration.

Keywords: local area network dual token ring, station, message, single buffer, ordinary service discipline, steady-state probabilities.

Введение. В процессе проектирования сложных технических систем и сетей, включая авиационные и технологические, а также при разработке новейших протоколов множественного доступа, существенную роль играют математические модели, описывающие средства информационного обмена и обработки информации. Локальные вычислительные сети (ЛВС) широко применяются в настоящее время для автоматизации производства, учрежденческой деятельности, поскольку являются недорогим, простым и надёжным средством передачи данных [1, с. 10]. Поэтому представляет интерес проблема повышения эффективности их практического применения.

Протокол маркерного доступа [2, с. 101] является одной из самых эффективных схем, обеспечивающих связь между станциями в кольцевой сети передачи данных. При помощи этого протокола происходит подключение подавляющего числа пользователей высокоскоростного, беспроводного и телефонного Интернета. Кольцевая ЛВС [3, с. 121] с маркерным доступом относится к протоколам детерминированного множественного доступа циклического типа. Она представляет собой совокупность абонентских станций (АС), соединенных последовательно двухточечными линиями. АС получают право на передачу данных при получении специального служебного кадра – маркера, циркулирующего по кольцу. Функционирование сети происходит в соответствии со стандартом ANSI/IEEE 802.5 [4, с. 23].

Рассматривается архитектура двойного кольца с протоколом маркерного доступа. Предложенный подход базируется на идее, что в сети имеются два кольца в качестве передающей среды и два маркера, циркулирующих по этим кольцам. Кольцо 1 будем считать прямым каналом. Маркер, движущийся по прямому каналу, называется прямым (forward token) и обозначается T_f .

Кольцо 2 будем считать обратным каналом. Маркер, движущийся по этому каналу, называется обратным (reverse token) и обозначается T_r . Прямой и обратный маркеры движутся по своим кольцам в противоположных направлениях. Другими словами, станции сети формируют двойной связанный список, в котором известны не только номера следующих станций, но и номера предыдущих. Будем предполагать, что маркеры T_f и T_r поступают и уходят со станций в одни и те же моменты времени (синхронно).

Описание математической модели. Рассматривается несимметричная кольцевая локальная вычислительная сеть (КЛВС) с протоколом маркерного доступа (стандарт

ANSI/IEEE 802.5), представляющая собой совокупность соединенных последовательно N АС, на каждой из которых имеется одноместный буфер для приема сообщений [5, с. 9]. Все АС связаны между собой двумя моноканалами. АС занумерованы таким образом, что номер станции увеличивается по направлению движения прямого маркера по кольцу. Обозначим через δ время передачи как прямого, так и обратного маркера по кольцу между соседними АС. Время передачи (обслуживания) одного сообщения для любой станции равно α . В течение этого времени станция обслуживает сообщение, если оно имеется в буфере, или ожидает момента отправки маркера, если буфер пустой. Поступающие на i -ую АС сообщения образуют простейший поток интенсивности $\lambda_i, 1 \leq i \leq N$.

Рассматривается ординарная дисциплина обслуживания [6, с. 63], которая предполагает, что станция передает сообщение, когда маркер поступает, но не передает ни одного сообщения, которые поступают после прихода любого маркера (буфер блокируется, поскольку занят). Таким образом, не более чем одно сообщение может быть передано с любой АС пока маркеры T_f и T_r находятся на станции. Обозначим через (i, j, k_1, \dots, k_N) состояние рассматриваемой КЛВС, где i – номер станции, на которую поступает маркер T_f , j – номер станции, где находится маркер T_r , k_m – число сообщений на станции с номером $m, 1 \leq m \leq N$, в момент поступления маркера T_f или T_r на нее, $k_m \in \{0, 1\}$. Стационарные вероятности этих состояний обозначим через $P(i, j, k_1, \dots, k_N)$.

Стационарные вероятности и вероятностно-временные характеристики. Поведение рассматриваемой КЛВС в моменты поступления T_f и T_r на АС можно описать при помощи периодической цепи Маркова [7, с. 39].

Обозначим через $A_{i,j}$ матрицу вероятностей переходов, где i – номер АС, на которую приходит маркер T_f , j – номер АС, на которую приходит маркер T_r . Очевидно, что номера следующих станций, куда T_f и T_r поступают со станций i и j – это $i+1$ и $j-1, 1 \leq i, j \leq N$. Обозначим через $P(i, j)$ вектора стационарных вероятностей. Стационарные вероятности состояний рассматриваемой сети являются решением следующей векторно-матричной системы:

$$\begin{aligned} P(i+1, j-1) &= P(i, j) A_{ij}; \\ P(i, j) \left(I + \sum_{k=1}^{N-1} \prod_{c=1}^k A_{i+c, j-c} \right) E &= 1; \\ P(i, j) \left(I - \sum_{k=1}^N \prod_{c=1}^k A_{i+c, j-c} \right) &= 0. \end{aligned}$$

Здесь E – вектор, состоящий из 2^N единиц, $I - (2^N \times 2^N)$ единичная матрица, A_{ij} – матрица переходных вероятностей размерности $(2^N \times 2^N)$, где $1 \leq i, j \leq N$. Эти вероятности вычисляются по формуле

$$a(i, j, k, r) = p_{\beta_i}^i(\delta) p_{\beta_j}^j(\delta) \prod_{c=1; c \in i, j}^N p_{\beta_c - \alpha_c}^c(\delta + a) I_{\{\beta_c \geq \alpha_c\}},$$

где $0 \leq k, r \leq 2^N - 1$, $I_{\{B\}}$ – индикатор множества B , $p_0^i(t) = e^{-\lambda_i t}$, $p_1^i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$, α_c – коэффициенты состояния $(i, j, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$, β_c – коэффициенты состояния $(i, j, \beta_1, \dots, \beta_N)$.

Основными характеристиками, определяющими эффективность функционирования рассматриваемой КЛВС [8, с. 38], являются следующие:

1. Вероятность того, что все АС свободны (сеть свободна)

$$P_0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j, 0, \dots, 0).$$

2. Вероятность того, что все АС заняты

$$PZ = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j, 1, \dots, 1).$$

3. Среднее число занятых АС

$$LZ = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{\alpha_i=0}^1 P(i, j, \alpha_1, \dots, \alpha_N) \sum_{r=1}^N I_{\{\alpha_r \neq 0\}}.$$

4. Среднее число свободных АС

$$LE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{\alpha_i=0}^1 P(i, j, \alpha_1, \dots, \alpha_N) \sum_{r=1}^N I_{\{\alpha_r=0\}}.$$

5. Средняя продолжительность обслуживания сообщений на АС в КЛВС за время обращения маркера

$$TM = \Delta LZ.$$

6. Среднее время обращения маркеров по кольцу

$$TL = N\delta + TM.$$

7. Среднее число сообщений, поступивших за время обращения маркеров по сети

$$MS = TL \sum_{i=1}^N \lambda_i.$$

8. Среднее число потерянных за время обращения маркера сообщений

$$MLS = MS - LZ.$$

9. Вероятность потери сообщения

$$PL = \frac{MLS}{MS}.$$

Заключение. В результате проведенных исследований разработана математическая модель несимметричной локальной сети двойное маркерное кольцо, на каждой станции которой имеется одноместный буфер. Обслуживание сообщений происходит одновременно на двух станциях, на которых находятся прямой и обратный маркеры. Предложенная модель основана на описании процесса функционирования несимметричной маркерной кольцевой ЛВС при помощи циклических Марковских процессов [9, с. 110]. Показано, что стационарные вероятности состояний рассматриваемой сети определяются из систем векторно-матричных уравнений, размерность которых зависит от числа АС. На основе анализа периодов занятости получены формулы для вычисления основных характеристик функционирования сети [10, с. 20]. Локальные сети такого типа очень широко используются в настоящее время и проблемы их оптимизации, эффективности работы являются актуальными [11, с. 134].

Литература

1. Бураковский, В. В. Локальные вычислительные сети: курс лекций / В. В. Бураковский, В. О. Родченко. – Гомель : УО «ГТУ им. Ф. Скорины», 2008. – 78 с.
2. Takagi, H. Analysis of Polling Systems / H. Takagi. – Cambridge, M.A. : MIT Press, 1986. – 198 p.
3. Бакс, В. Кольцевые локальные сети с маркерным доступом и их производительность / В. Бакс // ТИИЭР. – 1989. – № 2. – С. 121–142.
4. ANSI/IEEE 802.5 Standard-1985. Token-passing Ring Access Method and Physical Layer Specification // IEEE Press. – 1985. – 89 p.
5. Бураковский, В. В. Кольцевая локальная сеть с протоколом маркерного доступа / В. В. Бураковский, Г.А. Медведев // Техника средств связи. Сер. Системы связи. – 1990. – Вып. 7. – С. 9–16.
6. Бураковский, В. В. Маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и ординарным обслуживанием сообщений / В. В. Бураковский // Сборник научных трудов. – 1998. – Вып. 1 : Аэрокосмическое приборостроение России. Сер. 2, Авионика. – С. 63–67.
7. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания / В. В. Бураковский // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 2 (27). – С. 39–41.

8. Burakovski, V. V. Non-symmetric Dual-Ring Token-Passing Local Area Network / V. V. Burakovski // Modern scientific potential – 2015 : materials of the XI International scientific and practical conference, Sheffield, February 28 – March 7, 2015. – Sheffield : Science and education LTD, 2015. – Vol. 34 : Mathematics. Modern information technologies. – P. 38–41.

9. Бураковский, В. В. Маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания с сокращением / В. В. Бураковский // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. – 2017. – № 3 (102). – С. 109–113.

10. Бураковский, В. В. Имитационная модель КЛВС с бесконечными буферами и вентильным обслуживанием / В. В. Бураковский // Efektivní nástroje moderních věd – 2013 : materiály IX mezinárodní vědecko-praktická conference, Praha, 27 dubna – 05 květn 2013 roku. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013. – Díl 40 : Matematika. – P. 19–22.

11. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и дисциплиной Бернулли обслуживания сообщений / В. В. Бураковский // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. – 2020. – № 3 (120). – С. 131–134.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 19.01.2021

О сверхразрешимости конечномерных алгебр Ли

А.Ф. ВАСИЛЬЕВ

Пусть L – алгебра Ли над полем P . Подалгебру H алгебры L назовём 1-субнормальной в L , если либо $H = L$, либо существует цепь подалгебр $H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = L$ такая, что $\dim H_i - \dim H_{i-1} = 1$ для $i = 1, \dots, n$. В статье получены новые признаки сверхразрешимости конечномерной алгебры L , обладающих заданной системой 1-субнормальных подалгебр.

Ключевые слова: конечномерная алгебра Ли, сверхразрешимая алгебра Ли, 1-субнормальная подалгебра максимальная подалгебра.

Let L be a Lie algebra over a field P . A subalgebra H of L is called 1-subnormal in L if either $H = L$, or there exists a chain of subalgebras $H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = L$ such that $\dim H_i - \dim H_{i-1} = 1$ for $i = 1, \dots, n$. In this paper we obtain new criteria for supersolvability of a finite-dimensional algebra L with a given system of 1-subnormal subalgebras.

Keywords: finite-dimensional Lie algebra, supersolvable Lie algebra, 1-subnormal subalgebra, maximal subalgebra.

Введение. В работе рассматриваются только конечномерные алгебры Ли над полем P . Одним из основных современных направлений теории конечных групп является изучение классов конечных групп, в частности, формаций. Важным понятием теории классов конечных групп является понятие насыщенной формации. Напомним, что класс \mathbf{F} конечных групп называется насыщенным, если из $G/\Phi(G) \in \mathbf{F}$ следует, что $G \in \mathbf{F}$, где $\Phi(G)$ – подгруппа Фраттини группы G . Насыщенные формации конечных групп в настоящее время активно применяются при решении различных задач как в самой теории групп, так за ее пределами.

Основы теории насыщенных формаций разрешимых алгебр Ли были заложены в работах Д.В. Барнса и Х.М. Гестайнеу-Хилза [1], Д.В. Барнса и М.Л. Ньюела [2]. Для разрешимой алгебры Ли L пересечение $\Phi(L)$ всех ее максимальных подалгебр является идеалом в L . В случае произвольной алгебры Ли L подалгебра $\Phi(L)$ необязательно является идеалом в L . Поэтому рассматривается наибольший идеал L , содержащийся в $\Phi(L)$, который называется идеалом Фраттини и обозначается $\varphi(L)$. Согласно [1]–[2] формация \mathbf{F} , состоящая из алгебр Ли, называется насыщенной, если для любой алгебры Ли L из $L/\varphi(L) \in \mathbf{F}$ следует, что $L \in \mathbf{F}$. Примерами насыщенных формаций, состоящих из разрешимых алгебр Ли, являются формации всех нильпотентных, разрешимых и сверхразрешимых алгебр Ли [3]. Напомним, что алгебра Ли L называется сверхразрешимой, если в L имеется ряд идеалов, размерности всех факторов которого равны 1.

Одним из активно развиваемых современных направлений теории конечных групп является распознавание групп и их формаций по вложению заданных систем подгрупп, а также свойствам произведений групп. Хорошо известна теорема Бэра [4] о том, что *конечная группа, являющаяся произведением своих нормальных сверхразрешимых подгрупп, сверхразрешима тогда и только тогда, когда её коммутант нильпотентен*. Аналог этой теоремы для алгебр Ли, в том числе и бесконечномерных, был получен в [5]. В частности, из [5] следует

Теорема 1.1. Пусть L – алгебра Ли над полем P . Если $L = A + B$, где A и B – сверхразрешимые идеалы в L и коммутант L^2 нильпотентен, то L сверхразрешима.

Другим известным результатом теории групп является теорема Хупперта [4]: *конечная группа G сверхразрешима тогда и только тогда, когда индекс в G всякой максимальной подгруппы G является простым числом*. Аналог данной теоремы для алгебр Ли верен в разрешимом случае [3]:

Теорема 1.2. Пусть L – разрешимая алгебра Ли над полем P . Тогда и только тогда L сверхразрешима, когда $\dim L - \dim M = 1$ для любой максимальной подалгебры M алгебры L .

Пусть \mathbf{P} – множество всех простых чисел. В [6] было введено понятие \mathbf{P} -субнормальной подгруппы конечной группы G . Напомним, что подгруппа H конечной группы G называется \mathbf{P} -субнормальной, если либо $H = G$, либо существует цепь подгрупп $H = H_0 \subset \dots \subset H_n = G$, где $|H_i : H_{i-1}| \in \mathbf{P}$ для $i = 1, \dots, n$.

В частности, в [6] было показано, что если группа G является произведением своих \mathbf{P} -субнормальных сверхразрешимых подгрупп A и B и коммутант G' нильпотентен, то G сверхразрешима.

Многие результаты о сверхразрешимых группах могут быть сформулированы на языке \mathbf{P} -субнормальных подгрупп. Например, известная теорема Крамера [4, теорема 3.3] может быть сформулирована следующим образом: разрешимая группа G сверхразрешима тогда и только тогда, когда всякая максимальная подгруппа G \mathbf{P} -субнормальна в G или содержит подгруппу Фиттинга группы G .

В данной работе мы (совместно с В.И. Мурашко) вводим следующее определение.

Определение 1.1. Пусть L – алгебра Ли над полем \mathbf{P} . Подалгебру H назовём 1-субнормальной если либо $H = L$, либо существует цепь подалгебр $H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = L$ такая, что $\dim H_i - \dim H_{i-1} = 1$ для $i = 1, \dots, n$.

Целью данной работы является получение аналогов, отмеченных выше результатов для алгебр Ли.

Основные результаты. Используются стандартные определения и обозначения, которые могут быть найдены в [7]. Нам понадобятся следующие леммы.

Лемма 2.1. Пусть H – 1-субнормальная подалгебра алгебры Ли L над полем \mathbf{P} . Если I – идеал L , то $(H + I)/I$ – 1-субнормальная подалгебра L/I .

Доказательство. Если $H + I = L$, то лемма верна. Предположим, что $H + I \neq L$. Пусть цепь подалгебр $H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = L$ удовлетворяет $\dim H_i - \dim H_{i-1} = 1$ для $i = 1, \dots, n$. Так как $H + I \neq L$, то существует $k \in \{1, \dots, n\}$ такое, что $(H_k + I)/I \neq (H_{k-1} + I)/I$. Откуда $0 < \dim(H_k + I)/I - \dim(H_{k-1} + I)/I = \dim H_k / (H_k \cap I) - \dim H_{k-1} / (H_{k-1} \cap I) = \dim H_k - \dim(H_k \cap I) - (\dim H_{k-1} - \dim(H_{k-1} \cap I)) = 1 - (\dim(H_k \cap I) - \dim(H_{k-1} \cap I)) \leq 1$. Так как размерность – целое число, то $\dim(H_k + I)/I - \dim(H_{k-1} + I)/I = 1$. Убирая повторения из цепи $(H + I)/I = (H_0 + I)/I \subseteq (H_1 + I)/I \subseteq \dots \subseteq (H_n + I)/I = L/I$ и повторяя предыдущие рассуждения, получим утверждение леммы.

Лемма 2.2. Если H – субнормальная подалгебра разрешимой алгебры Ли L над полем \mathbf{P} , то H 1-субнормальна в L .

Доказательство. Так как H – субнормальная подалгебра L , то существует такая цепь подалгебр $H = H_0 \triangleleft H_1 \triangleleft \dots \triangleleft H_n = L$, что H_i/H_{i-1} – простая алгебра. Так как L разрешима, то H_i/H_{i-1} одномерна. Тогда по определению H 1-субнормальна в L . Лемма доказана.

Лемма 2.3. Пусть H – 1-субнормальная подалгебра алгебры Ли L над полем \mathbf{P} . Если I – идеал L , то $H \cap I$ – 1-субнормальная подалгебра I .

Доказательство. Если $H \cap I = I$, то лемма верна. Предположим, что $H \cap I \neq I$. Пусть цепь подалгебр $H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = L$ удовлетворяет $\dim H_i - \dim H_{i-1} = 1$ для $i = 1, \dots, n$. Так как $H \cap I \neq I$, то существует $k \in \{1, \dots, n\}$ такое, что $H_k \cap I \neq H_{k-1} \cap I$. Откуда $0 < \dim(H_k \cap I) - \dim(H_{k-1} \cap I) = (\dim(H_k \cap I) + \dim H_{k-1} - \dim(H_k \cap H_{k-1} \cap I)) - \dim H_{k-1} = \dim((H_k \cap I) + H_{k-1}) - \dim H_{k-1}$. Из $H_{k-1} \subseteq ((H_k \cap I) + H_{k-1}) \subseteq H_k$ и $\dim H_k - \dim H_{k-1} = 1$, следует $((H_k \cap I) + H_{k-1}) = H_k$. Значит, $\dim(H_k \cap I) - \dim(H_{k-1} \cap I) = 1$. Убирая повторения из цепи $(H \cap I) = (H_0 \cap I) \subseteq (H_1 \cap I) \subseteq \dots \subseteq (H_n \cap I) = I$ и повторяя предыдущие рассуждения, получим искомое утверждение.

Теорема 2.1. Пусть L – алгебра Ли над полем \mathbf{P} . Если $L = A + B$, где A и B – 1-субнормальные сверхразрешимые подалгебры Ли и коммутант L^2 нильпотентен, то L – сверхразрешима.

Доказательство. Предположим, что теорема неверна, и пусть алгебра L – контрпример наименьшей размерности.

1) $\Phi(L) = 0$. Предположим, что $\Phi(L) \neq 0$. Тогда

$$L/\Phi(L) = (A + \Phi(L))/\Phi(L) + (B + \Phi(L))/\Phi(L).$$

По лемме 2.1 подалгебры $(A + \Phi(L))/\Phi(L)$ и $(B + \Phi(L))/\Phi(L)$ 1-субнормальны в $L/\Phi(L)$. Так как $(L^2 + \Phi(L))/\Phi(L) \subseteq ((L + \Phi(L))/\Phi(L))^2$ и гомоморфным образом сверхразрешимой алгебры Ли является сверхразрешимая алгебра Ли, то подалгебры $(A + \Phi(L))/\Phi(L)$ и $(B + \Phi(L))/\Phi(L)$ сверхразрешимы. Так как $\dim L/\Phi(L) < \dim L$, по нашему предположению $L/\Phi(L)$ сверхразрешима. По [3] L является сверхразрешимой.

2) В L имеется единственный минимальный идеал $I = N(L)$. Предположим, что в L имеются два различных минимальных идеала I_1 и I_2 . Доказывая по аналогии с 1), получаем, что L/I_i сверхразрешима для $i = 1, 2$. Так как класс всех сверхразрешимых алгебр образует формацию, то $L \cong L/(I_1 \cap I_2)$ является сверхразрешимой алгеброй Ли, что противоречит нашему утверждению. Поэтому в L имеется единственный минимальный идеал I . Так как коммутант L^2 нильпотентен, то L разрешима. Откуда следует, что идеал I абелев. Из $\Phi(L) = 0$ и теоремы 1.9.7 [7] следует, что $I = N(L)$, где $N(L)$ – ниль-радикал L . Так как всякая абелева алгебра Ли сверхразрешима, имеем $I = N(L) = L^2$.

3) $A + I \neq L \neq B + I$. Не теряя общности рассуждений, предположим, что $A + I = L$. Заметим, что $A \cap I$ является идеалом A . Так как идеал I абелев, $A \cap I$ является идеалом I . Из $A \neq L$ следует, что $A \cap I = 0$. Предположим, что A не является максимальной подалгеброй L . Тогда A содержится в максимальной подалгебре H алгебры L . Из $H + I = L$ по аналогии с предыдущим рассуждением заключаем, что $H \cap I = 0$. Так как алгебра L конечномерна, получаем противоречие $H = A$. Значит, A – максимальная подалгебра алгебры L . Так как A 1-субнормальна, имеем $\dim L = \dim A + 1$. Это значит, что $\dim I = 1$. Отсюда и из сверхразрешимости A следует, что в L имеется ряд идеалов, у которого факторы имеют размерность 1. По определению L сверхразрешима. Значит, $A + I \neq L$.

4) Подалгебры $A + I$ и $B + I$ являются сверхразрешимыми идеалами L . Так как $A + I$ – подалгебра в L , то $(A + I)^2 \subseteq L^2$ и, следовательно, подалгебра $(A + I)^2$ абелева. В частности, $(A + I)^2$ нильпотентна. Так как $A + I$ разрешима и I – идеал в $A + I$, то I – 1-субнормальная подалгебра в $A + I$ по лемме 2.2. Так как $I = L^2$, то $A + I$ – идеал L . Следовательно, A – 1-субнормальная подалгебра в $A + I$ лемме 2.3. Так как $\dim(A + I) < \dim L$, для $A + I$ теорема 2.1 верна. Значит, алгебра $A + I$ сверхразрешима.

5) *Заключительное противоречие.* Заметим, что алгебра L удовлетворяет условиям теоремы 1.1, а значит, сверхразрешима. Полученное противоречие завершает доказательство теоремы.

Следствие 2.1. Пусть L – алгебра Ли над полем P . Если $L = A + B$, где A – нильпотентный идеал L , а B – 1-субнормальная сверхразрешимая подалгебра Ли, то L сверхразрешима.

Доказательство. Предположим, что утверждение неверно. Пусть алгебра L – контрпример наименьшей размерности. По аналогии с шагами 1) и 2) предыдущей теоремы заключаем, что $\Phi(L) = 0$ и в L имеется единственный минимальный идеал I . Так как A – нильпотентный идеал L , то $I \subseteq A$. Откуда и из $\Phi(L) = 0$ заключаем, что $I = A$. Так как идеал I абелев, B – максимальная подалгебра L (см. шаг 3) предыдущей теоремы). Из 1-субнормальности B заключаем, что $\dim I = 1$. Так как $L/I \cong B$ – сверхразрешимая алгебра и $\dim I = 1$, алгебра L сверхразрешима. Получили противоречие.

Напомним, что группа $G = AB$ называется произведением взаимно sn -перестановочных подгрупп A и B , если A перестановочна со всякой субнормальной подгруппой подгруппы B , а B перестановочна со всякой субнормальной подгруппой подгруппы A [8]. Аналогичные ситуации могут быть рассмотрены и в случае алгебр Ли. Нам потребуется следующее предложение.

Предложение 2.1. Пусть L – алгебра Ли над полем P . Если $L = A + B$, где A – разрешимая подалгебра L , а сумма подалгебры B и произвольной субнормальной подалгебры из A есть подалгебра L , то подалгебра B 1-субнормальна в L .

Доказательство. Будем вести доказательство по $\dim L$. Если $\dim L \leq 1$, то предложение верно. Можно считать, что $\dim A > 1$ и $B \neq L$. Так как подалгебра A разрешима, то в A найдётся ряд подалгебр $0 = A_0 < \dots < A_n = A$ такой, что алгебра A_i/A_{i-1} является простой, а значит, одномерной. Из $B \neq L$ следует, что найдётся такое $j \in \{1, \dots, n\}$, что $(B + A_{j-1}) \neq (B + A_j)$. Вы-

берем наибольшее j , для которого $(B + A_{j-1}) \neq (B + A_j) = L$. Заметим, что $(B + A_{j-1})$ – подалгебра согласно условию. По предположению индукции B 1-субнормальна в $B + A_{j-1}$. $0 < \dim(A_j + B) - \dim(A_{j-1} + B) = \dim A_j - \dim A_{j-1} - (\dim(A_j \cap B) - \dim(A_{j-1} \cap B)) \leq 1$. Откуда заключаем, что $1 = \dim(A_j + B) - \dim(A_{j-1} + B) = \dim L - \dim(A_{j-1} + B)$. Значит, B 1-субнормальна в L .

Следствие 2.2. Пусть L – алгебра Ли над полем P , являющаяся суммой сверхразрешимых подалгебр A и B . Если сумма подалгебры A и произвольной субнормальной подалгебры из B есть подалгебра L , а сумма подалгебры B и произвольной субнормальной подалгебры из A есть подалгебра L и подалгебра L^2 нильпотентна, то L сверхразрешима.

Доказательство. Следует из теоремы 2.1 и предложения 2.1.

Пример 2.1. Пусть L – трёхмерная алгебра Ли над полем из двух элементов и пусть a, b, c – её базис: $[a, c] = a$, $[b, c] = b$, $[a, b] = c$. Данная алгебра является простой. Пусть $A = \langle a, c \rangle$ и $B = \langle b, c \rangle$. Заметим, что A и B – сверхразрешимые 1-субнормальные подалгебры L и $L = A + B$. Но L не сверхразрешима. Значит, условие нильпотентности коммутанта в теореме 2.1 не может быть опущено. Более того, L является неразрешимой алгеброй Ли, представимой в виде суммы двух разрешимых 1-субнормальных подалгебр. Как показано в работе [6], конечная группа разрешима, если она представима в виде произведения своих P -субнормальных разрешимых подгрупп. Значит, аналог данного результата для алгебр Ли неверен.

Лемма 2.4. Пусть I – минимальный идеал алгебры Ли L над полем P . Если $\dim I = 1$, то L^2 лежит в централизаторе I .

Доказательство. Пусть a – элемент базиса I и $b, c \in L$. Тогда существуют $\alpha, \beta \in P$ такие, что $[a, b] = \alpha a$ и $[a, c] = \beta a$. Имеем $0 = [a, [b, c]] + [c, [a, b]] + [b, [c, a]] = [a, [b, c]] + \alpha[c, a] - \beta[b, a] = [a, [b, c]]$. То есть $[b, c]$ принадлежит централизатору I . Ввиду произвольности выбора b и c получаем, что L^2 лежит в централизаторе I .

Теорема 2.2. Пусть L – разрешимая алгебра Ли над полем P . Если всякая максимальная подалгебра M алгебры L или 1-субнормальна в L или содержит $N(L)$, то L сверхразрешима.

Доказательство. Пусть теорема неверна и алгебра Ли L является контрпримером наименьшей размерности. Если $\Phi(L) \neq 1$, то для алгебры $L/\Phi(L)$ условия теоремы выполнены согласно теореме 1.9.7 [7]. Значит, $L/\Phi(L)$ сверхразрешима. По [3] L сверхразрешима. Получили противоречие.

Значит, $\Phi(L) = 0$. Тогда $N(L)$ есть прямая сумма минимальных идеалов I_i . Так как $\Phi(L) = 0$, для любого I_i найдётся максимальная подалгебра M_i такая, что $L = M_i + I_i$ и $M_i \cap I_i = 0$. По предположению теоремы $\dim I_i = 1$. По лемме 2.4 L^2 лежит в централизаторе I_i . Значит, L^2 лежит в централизаторе $N(L)$. По [8] $L^2 \subseteq N(L)$. Значит, всякая максимальная подалгебра M , содержащая $N(L)$, является идеалом в L , а значит, 1-субнормальна в L . По [3] получаем, что L сверхразрешима. Данное противоречие и завершает доказательство теоремы.

Заключение. В работе [11] Д. Тауэрс показал, что существуют несверхразрешимые алгебры Ли L , у которых каждая максимальная подалгебра является 1-субнормальной в L .

Теорема 3.1 [11]. Пусть L – алгебра Ли над полем P , причем, число элементов поля P не меньше $\dim L$. Тогда следующие утверждения эквивалентны.

(i) Каждая максимальная подалгебра M алгебры G имеет коразмерность 1 в L .

(ii) $L/\gamma(L) = S \oplus R$, где $S = S_1 \oplus \dots \oplus S_n$, и S_i является простым идеалом $L/\gamma(L)$ изоморфным $L_1(0)$ для каждого $1 \leq i \leq n$, или равным 0, и R является сверхразрешимым идеалом в $L/\gamma(L)$ (возможно, равным 0).

Обозначим через U^* ($U^\#$) класс всех алгебр Ли, у которых каждая (максимальная) подалгебра является 1-субнормальной в L .

Проблема 3.2. Описать свойства замыкания классов U^* ($U^\#$) в смысле работы [12]. Найти аналоги теорем 2.1 и 2.2 для классов U^* ($U^\#$).

Литература

2. Barnes, D. W. Some Theorems on Saturated Homomorphs of Soluble Lie Algebras / D. W. Barnes, M. L. Newell // *Math. Z.* – 1970. – V. 115. – P. 179–187.
3. Barnes, D. W. On the cogomology of soluble Lie algebras / D. W. Barnes // *Math. Z.* – 1967. – V. 101. – P. 343–349.
4. Between Nilpotent and Soluble / H. G. Bray [et al.] ; ed. M. Weinstein. – Passaic : Polygonal Publishing House, 1982. – 240 p.
5. Kashiwagi, Y. Supersoluble Lie algebras / Y. Kashiwagi // *Hirosima Math. J.* – 1984. – V. 14. – P. 575–595.
6. Васильев, А. Ф. О произведениях \mathbf{P} -субнормальных подгрупп в конечных группах / А. Ф. Васильев, Т. И. Васильева, В. Н. Тютянов // *Сиб. мат. журн.* – 2012. – Т. 53, № 1. – С. 59–67.
7. Бахтурин, Ю. А. Тожества в алгебрах Ли / Ю. А. Бахтурин. – М. : Наука, 1985. – 448 с.
8. Alejandro, M. On some permutable products of supersoluble groups / A. Alejandro, A. Ballester-Bolinches, J. Cossey, M. Pedraza-Aguilera // *Rev. Mat. Iberoamericana.* – 2004. – V. 20. – P. 413–425.
9. Stewart, I. Bounds for the dimensions of certain Lie algebras / I. Stewart // *J. London Math. Soc.* – 1971. – V. 2, № 3. – P. 731–732.
10. Васильев, А. Ф. О конечных группах сверхразрешимого типа / А. Ф. Васильев, Т. И. Васильева, В. Н. Тютянов // *Сиб. мат. журн.* – 2010. – Т. 51, № 6. – С. 1270–1281.
11. Towers, D. Maximal subalgebras of Lie algebras containing Engel subalgebras / D. Towers // *Journal of Pure and Applied Algebra.* – 2012. – V. 216. – P. 688–693.
12. Gutierrez, I. S. Classes of algebras and closure operation / I. S. Gutierrez, A. Torresblanca-Badillo, D. A. Towers // *Communications in Algebra.* – 2020. – V. 49, № 6. – P. 1–15.

УДК 514.765.1

Тензоры Риччи инвариантных связностей на редутивных пространствах

Н.П. МОЖЕЙ

В общем случае задача исследования многообразий различных типов и структур на них является достаточно сложной, поэтому данная задача рассматривается в классе редутивных однородных пространств, среди которых широкий подкласс образуют пространства с разрешимой группой преобразований. Исследование таких пространств существенно затруднено тем, что, в отличие от полупростых групп преобразований, не разработана структурированная теория их классификации, а сама классификация является громоздкой и трудоемкой. Если однородное пространство является редутивным, то оно всегда допускает инвариантную связность. В работе изучаются трехмерные редутивные однородные пространства, допускающие как эквиаффинную, так и нормальную связность. Найдены и описаны в явном виде тензоры Риччи инвариантных связностей на трехмерных редутивных однородных пространствах с разрешимой группой преобразований.

Ключевые слова: эквиаффинная связность, нормальная связность, редутивное пространство, группа преобразований, тензор Риччи.

In general, the problem of the research of manifolds of various types and structures on them is rather complicated; therefore, this problem is considered in the class of reductive homogeneous spaces, among which a wide subclass is formed by spaces with a solvable transformation group. The study of such spaces is significantly complicated by the fact that, in contrast to semisimple transformation groups, a structured theory of their classification has not been developed, and the classification itself is cumbersome and laborious. If a homogeneous space is reductive, then the space admits an invariant connection. In this paper, we study three-dimensional reductive homogeneous spaces that admit both equiaffine and normal connection. Ricci tensors invariant connections on three-dimensional reductive homogeneous spaces with a solvable transformation group are found and described in explicit form.

Keywords: equiaffine connection, normal connection, reductive space, transformation group, Ricci tensor.

Введение. В общем случае задача исследования многообразий различных типов и структур на них является достаточно сложной, поэтому данная задача рассматривается в классе редутивных однородных пространств, среди которых широкий подкласс образуют пространства с разрешимой группой преобразований. Исследование таких пространств существенно затруднено тем, что, в отличие от полупростых групп преобразований, не разработана структурированная теория их классификации, а сама классификация является громоздкой и трудоемкой. Если однородное пространство является редутивным, то оно всегда допускает инвариантную связность.

В работе обсуждаются существование и свойства инвариантных связностей на однородных пространствах, результаты Вана [1] применяются к ситуации, когда существует инвариантная структура на однородном пространстве, а именно, конструкция используется для случая редутивного пространства. Тензор Риччи задаёт один из способов измерения кривизны многообразия (степени отличия геометрии многообразия от геометрии плоского пространства), в общей теории относительности тензор кривизны Риччи служит ключевым компонентом уравнений Эйнштейна. Кривизна Риччи появляется и в уравнении потока Риччи, в котором зависящая от времени метрика деформируется пропорционально кривизне Риччи (со знаком минус). Поток Риччи ввел Р. Гамильтон, он же получил глубокие результаты в теории трехмерных многообразий. В работах, связанных с доказательством гипотезы Пуанкаре, потоки Риччи использовались как важное техническое средство, было получено много результатов о существовании и свойствах таких потоков (см., например, [2]). Понятие нормальной связности ввел Э. Картан (для риманова многообразия, см. [3]). Аффинная связность является эквиаффинной, если допускает параллельную форму объема (см. [4]). Трехмерные редутивные однородные пространства разрешимых групп Ли изучались в [5], в данной работе находятся и описываются в явном виде тензоры Риччи инвариантных связностей на указанных пространствах.

Основные определения. Пусть M – дифференцируемое многообразие, на котором транзитивно действует группа \bar{G} , (M, \bar{G}) – однородное пространство, $G = \bar{G}_x$ – стабилизатор произвольной точки $x \in M$. Пусть $\bar{\mathfrak{g}}$ – алгебра Ли группы Ли \bar{G} , а \mathfrak{g} – подалгебра, соответствующая подгруппе G . Пара $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ алгебр Ли называется *эффективной*, если подалгебра \mathfrak{g} не содержит отличных от нуля идеалов $\bar{\mathfrak{g}}$, пара $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ называется *изотропно-точной*, если точно изотропное представление \mathfrak{g} .

Пусть $M = \bar{G}/G$ – однородное пространство, на котором связная группа \bar{G} действует транзитивно и эффективно. Пространство \bar{G}/G *редуктивно*, если алгебра Ли $\bar{\mathfrak{g}}$ может быть разложена в прямую сумму векторных пространств – алгебры Ли \mathfrak{g} и $\text{ad}(G)$ -инвариантного подпространства \mathfrak{m} , т. е. если $\bar{\mathfrak{g}} = \mathfrak{g} + \mathfrak{m}$, $\mathfrak{g} \cap \mathfrak{m} = 0$; $\text{ad}(G)\mathfrak{m} \subset \mathfrak{m}$. Второе условие влечет $[\mathfrak{g}, \mathfrak{m}] \subset \mathfrak{m}$ и наоборот, если G связна. Там, где это не будет вызывать разночтения, будем отождествлять подпространство, дополнительное к \mathfrak{g} в $\bar{\mathfrak{g}}$, и факторпространство $\mathfrak{m} = \bar{\mathfrak{g}}/\mathfrak{g}$.

Аффинной связностью на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ называется такое отображение $\Lambda: \bar{\mathfrak{g}} \rightarrow \mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$, что его ограничение на \mathfrak{g} есть изотропное представление подалгебры, а все отображение является \mathfrak{g} -инвариантным. Инвариантные аффинные связности на однородном пространстве (M, \bar{G}) находятся во взаимно однозначном соответствии с аффинными связностями на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ (см., например, [6]). Если \bar{G}/G редутивно, то оно всегда допускает инвариантную связность и линейное представление изотропии для G всегда точное. Тензор кручения $T \in \text{Inv}T_2^1(\mathfrak{m})$ и тензор кривизны $R \in \text{Inv}T_3^1(\mathfrak{m})$ имеют вид

$$T(x_m, y_m) = \Lambda(x)y_m - \Lambda(y)x_m - [x, y]_m, \quad R(x_m, y_m) = [\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y]) \quad \text{для всех } x, y \in \bar{\mathfrak{g}}.$$

Будем говорить, что Λ имеет *нулевое кручение* или является *связностью без кручения*, если $T = 0$. Определим *тензор Риччи*

$$\text{Ric} \in \text{Inv}T_2(\mathfrak{m}): \text{Ric}(y, z) = \text{tr}\{x \mapsto R(x, y)z\}.$$

Будем говорить, что аффинная связность Λ является *локально эквиаффинной*, если $\text{tr}\Lambda([x, y]) = 0$ для всех $x, y \in \bar{\mathfrak{g}}$ (то есть $\Lambda([\bar{\mathfrak{g}}, \bar{\mathfrak{g}}]) \subset \mathfrak{sl}(\mathfrak{m})$). Аффинная связность Λ с нулевым кручением имеет симметрический тензор Риччи тогда и только тогда, когда она локально эквиаффинна. Под *эквиаффинной* связностью будем понимать аффинную связность Λ (без кручения), для которой $\text{tr}\Lambda(x) = 0$ для всех $x \in \bar{\mathfrak{g}}$. В этом случае очевидно, что $\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}) \in \mathfrak{sl}(\mathfrak{m})$.

Алгебра Ли \mathfrak{h}^ группы голономии* инвариантной связности $\Lambda: \bar{\mathfrak{g}} \rightarrow \mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$ на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ – это подалгебра алгебры Ли $\mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$ вида $V + [\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}, V) + [\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}, [\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}, V])] + \dots$, где V – подпространство, порожденное множеством $\{[\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y]) \mid x, y \in \bar{\mathfrak{g}}\}$. Положим \mathfrak{a} равной подалгебре в $\mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$, порожденной $\{\Lambda(x) \mid x \in \bar{\mathfrak{g}}\}$. Связность *нормальна*, если $\mathfrak{h}^* = \mathfrak{a}$.

Описание тензоров Риччи инвариантных связностей. Будем описывать пару $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ при помощи таблицы умножения алгебры Ли $\bar{\mathfrak{g}}$. Через $\{e_1, \dots, e_n\}$ обозначим базис $\bar{\mathfrak{g}}$ ($n = \dim \bar{\mathfrak{g}}$). Будем полагать, что \mathfrak{g} порождается e_1, \dots, e_{n-3} , а $\{u_1 = e_{n-2}, u_2 = e_{n-1}, u_3 = e_n\}$ – базис \mathfrak{m} . Для нумерации подалгебр используем запись $d.n$, а для нумерации пар – запись $d.n.m$, соответствующие приведенным в [5], здесь d – размерность подалгебры, n – номер подалгебры в $\mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$, а m – номер пары $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$. Будем описывать аффинную связность через образы базисных векторов $\Lambda(u_1), \Lambda(u_2), \Lambda(u_3)$, тензор кривизны R через $R(u_1, u_2), R(u_1, u_3), R(u_2, u_3)$, а тензор кручения T – через $T(u_1, u_2), T(u_1, u_3), T(u_2, u_3)$.

Теорема 1. Все трехмерные редутивные однородные пространства, допускающие как локально эквиаффинную, так и нормальную связность, такие, что $\bar{\mathfrak{g}}$ разрешима, а $\dim \mathfrak{g} > 1$, локально имеют следующий вид:

2.9.1.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	2.20.18, $\alpha=0$.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	
	e_1	0	$2e_2$	u_1	0	$-u_3$	e_1	0	0	0	u_1	0
	e_2	$-2e_2$	0	0	0	u_1	e_2	0	0	0	0	u_1
	u_1	$-u_1$	0	0	0	0	u_1	0	0	0	0	u_1
	u_2	0	0	0	0	0	u_2	$-u_1$	0	0	0	u_2
	u_3	u_3	$-u_1$	0	0	0	u_3	0	$-u_1$	$-u_1$	$-u_2$	0
2.9.2.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	2.21.1.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	
	e_1	0	$2e_2$	u_1	0	$-u_3$	e_1	0	e_2	u_1	0	$-u_3$
	e_2	$-2e_2$	0	0	0	u_1	e_2	$-e_2$	0	0	u_1	u_2
	u_1	$-u_1$	0	0	0	u_2	u_1	$-u_1$	0	0	0	0
	u_2	0	0	0	0	0	u_2	0	$-u_1$	0	0	0
	u_3	u_3	$-u_1$	$-u_2$	0	0	u_3	u_3	$-u_2$	0	0	0
2.9.4, $\mu=0, -1$.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	2.9.5, 2.9.6.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	
	e_1	0	$(1-\mu)e_2$	u_1	0	μu_3	e_1	0	e_2	u_1	0	0
	e_2	$(\mu-1)e_2$	0	0	0	u_1	e_2	$-e_2$	0	0	0	u_1
	u_1	$-u_1$	0	0	u_1	0	u_1	$-u_1$	0	0	0	$\pm e_2$
	u_2	0	0	$-u_1$	0	$-u_3$	u_2	0	0	0	0	αu_2
	u_3	$-\mu u_3$	$-u_1$	0	u_3	0	u_3	0	$-u_1$	$\mp e_2$	$-\alpha u_2$	0
2.9.7.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	2.17.2, 2.17.3.	e_1	e_2	u_1	u_2	u_3	
	e_1	0	e_2	u_1	0	0	e_1	0	0	0	0	u_1
	e_2	$-e_2$	0	0	0	u_1	e_2	0	0	0	0	u_2
	u_1	$-u_1$	0	0	0	0	u_1	0	0	0	0	$\pm e_1$
	u_2	0	0	0	0	u_2	u_2	0	0	0	0	αe_2
	u_3	0	$-u_1$	0	$-u_2$	0	u_3	$-u_1$	$-u_2$	$\mp e_1$	$-\alpha e_2$	0

Para	Совпадает с 2.17.2, за исключением
2.17.4	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 - e_2, [u_2, u_3] = e_1 + \alpha e_2, \alpha \geq 0$
2.17.6, 2.17.7	$[u_1, u_3] = \pm e_1, [u_2, u_3] = e_1 + e_2$
2.17.8	$[u_1, u_3] = \delta e_1 + u_1, [u_2, u_3] = \beta e_2 + \alpha u_2, -1 < \alpha < 1$
2.17.9	$[u_1, u_3] = \delta e_1 + e_2 + u_1, [u_2, u_3] = \gamma e_1 + \beta e_2 + \alpha u_1, -1 < \alpha < 1$
2.17.10	$[u_1, u_3] = \delta e_1 + u_1, [u_2, u_3] = e_1 + \beta e_2 + \alpha u_2, -1 < \alpha < 1$
2.17.13, 2.17.14	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 - e_2, [u_2, u_3] = \alpha e_2 + u_1$
2.17.15	$[u_1, u_3] = \alpha e_1, [u_2, u_3] = e_1 + \alpha e_2 + u_1$
2.17.17	$[u_1, u_3] = e_2, [u_2, u_3] = \alpha e_1 + \beta e_2 + u_1$
2.17.18	$[u_1, u_3] = \gamma e_2 + u_1, [u_2, u_3] = \alpha e_1 + \beta e_2 + u_1 + u_2$
2.17.19	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 + u_1, [u_2, u_3] = \beta e_2 + u_1 + u_2$
2.17.20	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 + u_1, [u_2, u_3] = \beta e_1 + \alpha e_2 + u_1 + u_2$
2.17.21	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 + u_1, [u_2, u_3] = e_1 + \alpha e_2 + u_2$
2.17.22	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 - \beta e_2 + u_1, [u_2, u_3] = \beta e_1 + \alpha e_2 + u_2, \beta > 0$
2.17.23	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 + u_1, [u_2, u_3] = \beta e_2 + u_2, \alpha \leq \beta $
2.17.24	$[u_1, u_3] = \delta e_1 + \gamma e_2 + \alpha u_1 - u_2, [u_2, u_3] = \beta e_1 + \delta e_2 + u_1 + \alpha u_2, \beta \leq \gamma $
2.17.25	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 + u_1, [u_2, u_3] = \beta e_2 - u_2, \alpha \leq \beta $
2.17.26	$[u_1, u_3] = \alpha e_1 + \beta e_2 + u_1, [u_2, u_3] = e_1 + \gamma e_2 - u_2, -1 \leq \beta \leq 1$

Доказательство для случая нормальной связности приведено в [5]. Найдем тензоры Риччи инвариантных связностей на указанных пространствах.

Рассмотрим, например, пару 2.9.1 (при $\lambda = 0, \mu = -1$). Тогда аффинная связность

$$\begin{pmatrix} 0 & p_{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & p_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} q_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & q_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & q_{1,1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -p_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & p_{1,2} & 0 \end{pmatrix}.$$

Тензор кривизны имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0 & p_{1,2}q_{2,2} - q_{1,1}p_{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & p_{2,3}q_{1,1} - q_{2,2}p_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -p_{1,2}p_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & 2p_{1,2}p_{2,3} & 0 \\ 0 & 0 & -p_{1,2}p_{2,3} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p_{2,3}q_{1,1} - q_{2,2}p_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & q_{1,1}p_{1,2} - p_{1,2}q_{2,2} & 0 \end{pmatrix},$$

найдем тензор Риччи $Ric(y, z) = \text{tr}\{x \mapsto R(x, y)z\}$, получаем

$$Ric = \begin{pmatrix} 0 & 0 & p_{1,2}p_{2,3} - p_{2,3}q_{1,1} + p_{2,3}q_{2,2} \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & 0 \\ -p_{1,2}p_{2,3} + p_{2,3}q_{1,1} - p_{2,3}q_{2,2} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

тензор Риччи является симметрическим при $p_{2,3}(p_{1,2} - q_{1,1} + q_{2,2}) = 0$, в частности, при $T = 0$.

У пары 2.9.2 ($\mu = -1$) аффинная связность совпадает с выписанной для 2.9.1, тензор Риччи

$$Ric = \begin{pmatrix} 0 & 0 & p_{1,2}p_{2,3} - p_{2,3}q_{1,1} + p_{2,3}q_{2,2} + q_{1,1} \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & 0 \\ -p_{1,2}p_{2,3} + p_{2,3}q_{1,1} - p_{2,3}q_{2,2} - q_{1,1} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

является симметрическим при $q_{1,1} = p_{2,3}(q_{1,1} - p_{1,2} - q_{2,2})$.

Рассмотрим пару 2.9.4 при $\mu = -1$, связность совпадает со случаем 2.9.1, в данном случае тензор Риччи $Ric =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & p_{1,2}p_{2,3} - p_{2,3}q_{1,1} + p_{2,3}q_{2,2} + p_{2,3} \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} - 2p_{1,2} & 0 \\ -p_{1,2}p_{2,3} + p_{2,3}q_{1,1} - p_{2,3}q_{2,2} - p_{2,3} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

также является симметрическим при $p_{2,3}(q_{1,1} - p_{1,2} - q_{2,2} - 1) = 0$, в частности, при $T = 0$.

В случае 2.21.1 при $\lambda = 0$ аффинная связность

$$\begin{pmatrix} 0 & p_{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,2} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -p_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,2} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -p_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & -p_{1,2} & 0 \end{pmatrix},$$

тензор Риччи

$$Ric = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -2p_{1,2}^2 \\ 0 & 2p_{1,2}^2 & 0 \\ -2p_{1,2}^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

является симметрическим.

Аналогично находим результаты для всех остальных случаев. Для пары 2.17.2 аффинная связность имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & p_{1,3} \\ 0 & 0 & p_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & q_{1,3} \\ 0 & 0 & q_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} r_{1,1} & -q_{1,3} & r_{1,3} \\ -p_{2,3} & r_{1,1} + p_{1,3} - q_{2,3} & r_{2,3} \\ 0 & 0 & r_{1,1} + p_{1,3} \end{pmatrix},$$

у пар 2.17.3, 2.17.4, 2.17.6, 2.17.7, 2.17.8, 2.17.9, 2.17.10, 2.17.13, 2.17.14, 2.17.15, 2.17.17, 2.17.18, 2.17.19, 2.17.20, 2.17.21, 2.17.22, 2.17.23, 2.17.24, 2.17.25, 2.17.26 связность такая же, как в случае 2.17.2. Для пары 2.20.18 при $\alpha = 0$ аффинная связность

$$\begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ 0 & q_{11} + p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & q_{11} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & r_{11} & 0 \\ 0 & p_{12} & r_{11} + p_{13} \end{pmatrix},$$

а для пар 2.9.4 ($\mu = 0$), 2.9.5, 2.9.6, 2.9.7 –

$$\begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & q_{23} \\ 0 & 0 & q_{11} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & r_{22} & r_{23} \\ 0 & p_{12} & r_{11} + p_{13} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, прямыми вычислениями получаем следующую теорему:

Теорема 2. Тензоры Риччи инвариантных связностей на трехмерных редутивных однородных пространствах разрешимых групп Ли, приведенных в теореме 1, имеют следующий вид:

Пара	Тензоры Риччи
2.9.1	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & p_{1,2}p_{2,3} - p_{2,3}q_{1,1} + p_{2,3}q_{2,2} \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & 0 \\ -p_{1,2}p_{2,3} + p_{2,3}q_{1,1} - p_{2,3}q_{2,2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$
2.9.2	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & S \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & 0 \\ -p_{1,2}p_{2,3} + p_{2,3}q_{1,1} - p_{2,3}q_{2,2} - q_{1,1} & 0 & 0 \end{pmatrix},$ $S = p_{1,2}p_{2,3} - p_{2,3}q_{1,1} + p_{2,3}q_{2,2} + q_{1,1}$
2.9.4, $\mu = 0$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} - 2p_{1,2} & 2p_{1,2}q_{2,3} - 2p_{1,3} - r_{1,1} \\ 0 & p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} + r_{2,2} & S \end{pmatrix},$ $S = p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} + r_{2,3}$
2.9.4, $\mu = -1$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & S \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} - 2p_{1,2} & 0 \\ -p_{1,2}p_{2,3} + p_{2,3}q_{1,1} - p_{2,3}q_{2,2} - p_{2,3} & 0 & 0 \end{pmatrix},$ $S = p_{1,2}p_{2,3} - p_{2,3}q_{1,1} + p_{2,3}q_{2,2} + p_{2,3}$
2.9.5	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & aq_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,3} \\ 0 & -aq_{2,2} + p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} & S \end{pmatrix},$ $S = -aq_{2,3} + p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} - 1$
2.9.6	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & aq_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,3} \\ 0 & -aq_{2,2} + p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} & S \end{pmatrix},$ $S = -aq_{2,3} + p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} + 1$
2.9.7	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & 2p_{1,2}q_{2,3} + q_{1,1} \\ 0 & p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} - q_{2,2} & S \end{pmatrix},$ $S = p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} - q_{2,3}$
2.20.18	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2p_{1,2}^2 & 2p_{1,2}p_{1,3} + q_{1,1} \\ 0 & 2p_{1,2}p_{1,3} - 2p_{1,2} - q_{1,1} & 2p_{1,3}^2 - 2p_{1,3} \end{pmatrix}$
2.21.1	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -2p_{1,2}^2 \\ 0 & 2p_{1,2}^2 & 0 \\ -2p_{1,2}^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
2.17.2	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - 1 \end{pmatrix}$

2.17.3	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a + 1 \end{pmatrix}$
2.17.4	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - 2a \end{pmatrix}$
2.17.6	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - 2 \end{pmatrix}$
2.17.7	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 + 2 \end{pmatrix}$
2.17.9	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -ap_{2,3} + p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - b - \delta - p_{1,3} \end{pmatrix}$
2.17.8, 2.17.10	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -aq_{2,3} + p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - b - \delta - p_{1,3} \end{pmatrix}$
2.17.13	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - p_{2,3} - 1 \end{pmatrix}$
2.17.14	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - p_{2,3} + 1 \end{pmatrix}$
2.17.15	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - 2a - p_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.17	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - b - p_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.18	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - b - p_{1,3} - p_{2,3} - q_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.19	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - b - p_{1,3} - p_{2,3} - q_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.20	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - 2a - p_{1,3} - p_{2,3} - q_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.21, 2.17.22	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - 2a - p_{1,3} - q_{2,3} \end{pmatrix}$

2.17.23	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - b - p_{1,3} - q_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.24	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -ap_{1,3} - aq_{2,3} + p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - 2\delta - p_{2,3} + q_{1,3} \end{pmatrix}$
2.17.25	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - b - p_{1,3} + q_{2,3} \end{pmatrix}$
2.17.26	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,3}^2 + 2p_{2,3}q_{1,3} + q_{2,3}^2 - a - \gamma - p_{1,3} + q_{2,3} \end{pmatrix}$

Заключение. Найдены и описаны в явном виде тензоры Риччи инвариантных связностей на трехмерных редутивных однородных пространствах с разрешимой группой преобразований. Полученные в работе результаты могут быть применены в работах по дифференциальной геометрии, дифференциальным уравнениям, топологии, а также в других разделах математики и физики, а алгоритмы, приведенные в работе, могут быть компьютеризованы и использованы для решения аналогичных задач в больших размерностях.

Литература

1. Wang, H. C. On invariant connections over a principal fibre bundle / H. C. Wang // Nagoya Math. J. – 1958. – № 13. – P. 1–19.
2. Chow, B. Mathematical Surveys and Monographs / B. Chow, D. Knopf. – Providence : American Mathematical Society, 2004. – Vol. 110, The Ricci flow : an introduction. – 325 p.
3. Картан, Э. Риманова геометрия в ортогональном репере / Э. Картан. – М. : Моск. ун-т, 1960. – 307 с.
4. Nomizu, K. Affine differential geometry / K. Nomizu, T. Sasaki. – Great Britain : Cambridge Univ. Press, 1994. – 263 p.
5. Можей, Н. П. Трехмерные редутивные пространства разрешимых групп Ли / Н. П. Можей // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2016. – № 6 (99). – С. 74–81.
6. Nomizu, K. Invariant affine connections on homogeneous spaces / K. Nomizu // Amer. Journ. Math. – 1954. – Vol. 76, № 1. – P. 33–65.

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 12.02.2021

УДК 004.41:004.054:004.7

Методы и средства анализа пользовательской активности в глобальной сети

В.А. РУБИН, О.С. РУДЬКО, Р.И. МАСТЕРСКОЙ

В статье рассматриваются методы и средства анализа пользовательской активности в глобальной сети. Выделяются необходимые сущности в предметной области, проводится обзор существующих средств и методов моделирования пользовательской активности в сети.

Ключевые слова: обратные ссылки, анализ пользовательской активности, SEO.

Methods and tools for analyzing user activity in the global network are considered. The necessary entities in the subject area are highlighted; an overview of the use of tools and methods of user activity in the network is carried out.

Keywords: back links, user behavior analytics, SEO.

Введение. Сегодня любой ресурс в глобальной сети, который базируется на покупке ссылок, сталкивается с тем, что поисковики придумывают все новые и новые алгоритмы ранжирования и фильтрации, поэтому продвигаться становится все сложнее и сложнее. Приходится работать все с большим количеством пессимизированных сайтов, придумывать, как вывести их из-под санкций поисковых систем, при этом результат очень сложно предсказать, и, конечно же, все это сказывается на получаемом доходе ресурса.

Несмотря на все усилия поисковиков, направленные на борьбу с попытками оптимизаторов влиять на поисковую выдачу с помощью использования внешних ссылок, бэклинки остаются одним из ключевых факторов, которые учитываются при ранжировании сайтов. Последние тенденции в поисковой оптимизации подтверждают смещение в сторону качества, а не количества, поскольку ссылки, которые, по мнению поисковой системы, не являются достаточно качественными или «спамными», просто теряют «вес», и становятся абсолютно бесполезными. Больше того, за попытки манипулирования поисковой выдачей могут быть наложены штрафные санкции, что отразится на позициях и усложнит продвижение.

Существует огромное количество ресурсов, которые помогают более эффективно использовать поисковую оптимизацию (search engine optimization, далее по тексту SEO) [1]:

- Ahrefs;
- Plagspotter;
- SemRush;
- WhiteSpark;
- Google Analytics;
- Segment;
- HotJar;
- FullStory.

Каждый из указанных сервисов позволяет вести учет метрик ресурса и его отдельных страниц по различным параметрам. На основании этих данных можно с легкостью моделировать сценарии использования ресурса рядовыми пользователями. Но данный процесс осложняется тем, что не существует единого сервиса, который предоставляет всю информацию в одном единственном месте.

В общем виде предметная область идеального инструментария сбора данных для моделирования пользовательской активности в глобальной сети состоит в следующем:

1. Анализ обратных ссылок на выбранный адрес.
2. Анализ обратных ссылок на выбранное доменное имя.
3. Анализ ссылочной массы.
4. Сравнение своего ресурса с конкурирующими.
5. Анализ уникальности информации.

6. Анализ упоминаний бизнеса с географическим разделением.
7. Список ключевых слов ресурса.
8. Частота опроса поисковыми ресурсами.
9. Рейтинг в различных «топах».

Причем вся информация должна быть доступна в рамках одного единого сервиса, а также представлена в удобном для восприятия табличном или графическом (диаграммы, графики) виде.

Средства анализа бэклинков. Если ссылка с сайта А размещается на сайте В, то она становится бэклинком сайта А. Увеличение параметров тИЦ и PR зависит от количества и качества бэклинков на сторонних ресурсах. Поэтому так важно иметь возможность удобного их анализа. Ahrefs.com – инструмент для анализа бэклинков, ведущих на сайт, с помощью которого можно анализировать ссылочную массу сайтов-конкурентов, и на основе полученных данных вырабатывать и совершенствовать свою стратегию наращивания внешних ссылок.

Доступно несколько платных тарифов на выбор, а также возможность зарегистрировать бесплатный аккаунт и попробовать функционал сервиса в ограниченном режиме.

У проекта существует веб-версия и возможность программного доступа (API).

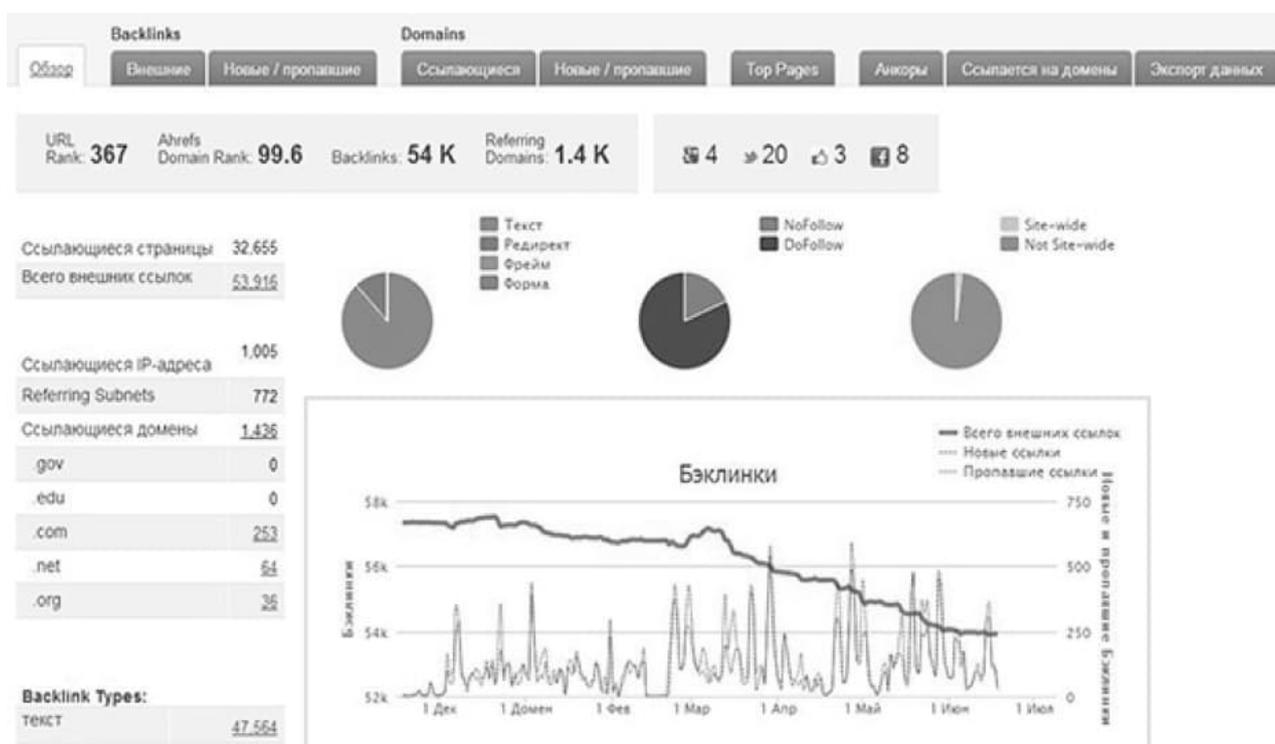


Рисунок 1 – Результат анализа обратных ссылок

Как видно на рисунке 1, показывается общая информация по количеству ссылок, социальным сигналам, статистика по доменам и доменным зонам. Также Ahrefs выводит важную информацию по параметрам ссылок, такую как соотношение nofollow/dofollow, текстовых и редиликтных анкоров, сквозные ссылки с изображений и т. д.

Много полезной информации по ссылочному профилю сайта выводится в виде графиков, например, ссылающиеся домены (рисунок 2), или же фразы анкоров (рисунок 3).



Рисунок 2 – Результат анализа ссылающихся доменов

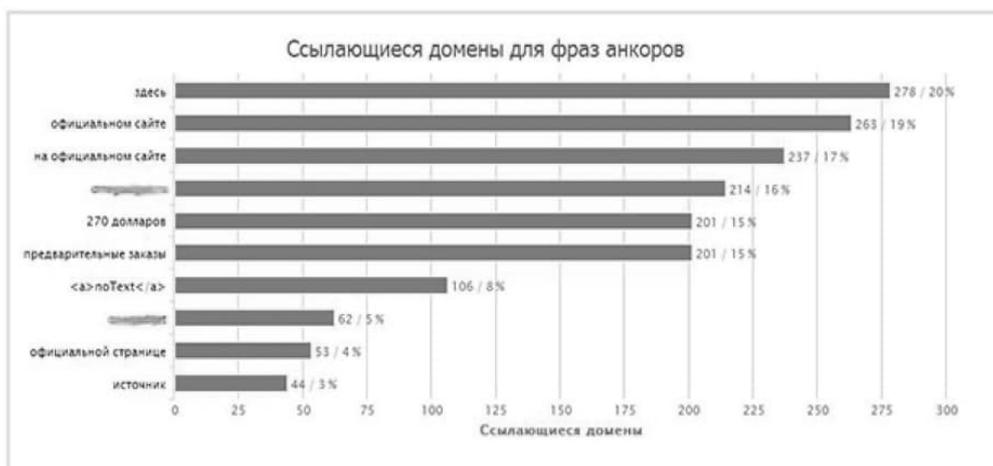


Рисунок 3 – Результат анализа ссылающихся доменов для фраз анкоров

Уже по этим двум графикам можно сделать выводы о динамике роста ссылочной массы анализируемого сайта и основным запросам, по которым он продвигается. Эти данные могут быть использованы при поиске оптимального ссылочного профиля для продвижения в высоко конкурентных тематиках. Также можно посмотреть список всех найденных ссылок, которые можно фильтровать по различным параметрам (рисунок 4).



Рисунок 4 – Детальный отчет запроса найденных обратных ссылок

При анализе сайтов-конкурентов особенно полезным будет инструмент «Сравнение доменов», при помощи которого можно вывести сравнительную информацию по нескольким сайтам, вплоть до 5 одновременно (рисунок 5).

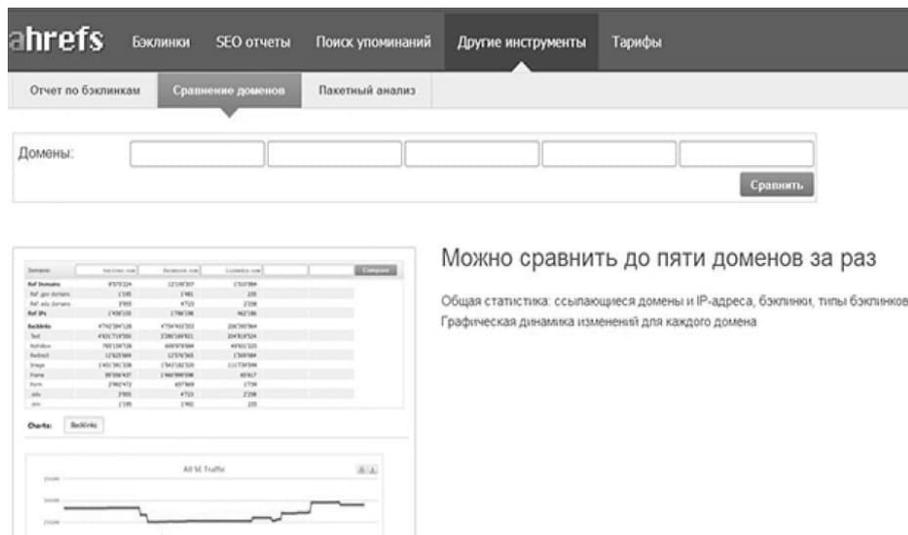


Рисунок 5 – Сравнение доменов

Даже на основании этого, сравнительно небольшого обзора, становится понятно, насколько богатыми возможностями обладает Ahrefs.com. Можно сказать, что на данный момент это действительно лучший инструмент для анализа беклинков, который существует на рынке. Причем, его одинаково эффективно можно применять как для Рунета, так и для сайтов англоязычного сегмента Интернета.

Средства анализа поведения пользователей. Для подбора правильной стратегии оптимизации сайта нужно проводить анализ пользовательского поведения, знать интересы пользователей: какие страницы посещают, по какому пути «перемещаются», какую информацию смотрят [2]. Это очень важно для повышения конверсии ресурса. Одним из самых популярных средств анализа пользовательского поведения является Fullstory. Этот инструмент представляет способ увидеть все, что происходит на сайте, таким, каким его видел пользователь. Можно воспроизвести любой пользовательский сеанс использования ресурса в точности так, как это пережил посетитель.

Fullstory предоставляет панели мониторинга (рисунок 6) – настраиваемые визуализации, которые можно создать, используя настраиваемые показатели, последовательности и определенные события. Есть возможность собрать всю соответствующую информацию на тематической панели мониторинга для мгновенных обновлений, а также для более глубокого понимания.

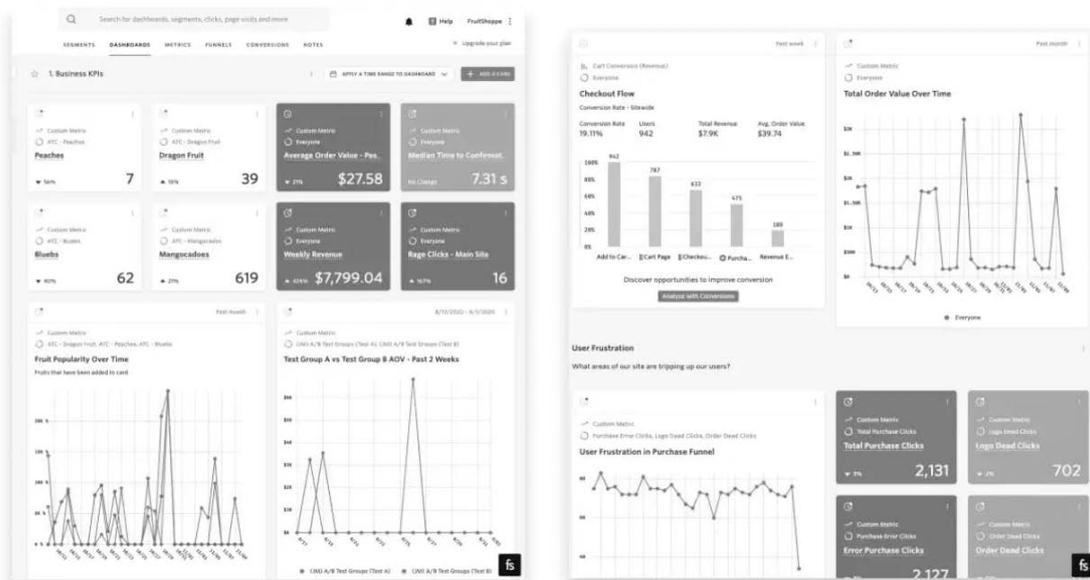


Рисунок 6 – Сводные результаты аналитики FullStory

Можно просмотреть автоматически связанные сеансы, относящиеся к этим данным. Независимо от того, на что ориентирована данная информационная панель, можно быстро увидеть агрегированные числа и легко детализировать взаимодействия пользователя, которые образуют метрику. Есть три типа карточек, которые можно использовать для создания информационных панелей. Карточка с единой метрикой используется для визуализации данных в виде одного числа или процента и идеально подходит для ответов на такие вопросы, как «Какова средняя стоимость заказа на этой неделе?» или «Какой процент пользователей использует мобильные устройства?» Карточки с одним показателем позволяют сразу видеть колебания. Карточки воронок позволяют понять действия, которые пользователи предпринимают для достижения цели, и где пользователи выпадают из ключевых потоков. Карточка «Воронка» показывает общий коэффициент выполнения от первого шага воронки до последнего, а также количество пользователей, которые дошли до каждого шага. Карточка тенденций помогает понять, как взаимодействие и опыт меняются с течением времени, и ответить на такие вопросы, как «Покупки растут или падают каждую неделю?» или «У наших клиентов обнаруживается меньше ошибок при повторении или больше ошибок?».

Заключение. Существует огромное количество средств и методов анализа пользовательской активности в глобальной сети. Но не существует единого решения, которое подойдет для ответа на все возможные вопросы, касающиеся пользовательского поведения. Каждый подход имеет свои недостатки и достоинства. В этой связи видится необходимость создания общих и универсальных подходов решения рассматриваемой проблемы.

Литература

1. Рубин, В. А. Визуализация поисковых запросов / В. А. Рубин // Актуальные вопросы физики и техники : материалы IV Республиканской науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 15 апреля 2015 г. : в 3 ч. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – Ч. 3. – С. 124.

2. Рубин, В. А. Инструментарий моделирования и исследования пользовательской активности в глобальной сети / В. А. Рубин, В. Р. Власенко // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Республиканской науч. конф., посвященной 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 9–11 ноября 2016 г. : в 2 ч. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – Ч. 2. – С. 258.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 09.04.2021

Методы и способы анализа надежности взаимодействия распределенных систем

О.С. Рудько, В.А. Рубин, Н.А. Алешин

Дано краткое описание распределенных систем и их надежности. Приводится обоснование преимуществ распределенных систем. Приведены формулы нахождения надежности и основные способы анализа распределенных систем. Рассматриваются примеры применения алгоритмов консенсуса.

Ключевые слова: надежность, отказоустойчивость, распределенные системы, консенсус.

A brief definition of distributed systems and reliability is presented. The substantiation of the advantages of distributed systems is considered. The formulas for finding the reliability and the main methods for the analysis of distributed systems are given. Examples of application of consensus algorithms are studied.

Keywords: reliability, fault tolerance, distributed systems, consensus.

Введение. Состояние современного общества неразрывно связано с процессами информатизации, затрагивающими практически все сферы человеческой деятельности. За периодом местной компьютеризации появилась эра создания распределенных информационных систем [1]–[3]. Распределенная система – это набор независимых компьютеров, объединенных в единое целое для представления пользователям. Важной особенностью распределенной системы является то, что от человека скрыто каким образом происходит процесс общения компонентов системы. Распределенные системы довольно легко поддаются масштабированию, расширению и тестированию. Эта характеристика является прямым следствием независимости и индивидуальности ее компонентов. Распределенные системы обычно работают безотказно, но некоторые их части могут временно выходить из строя. Пользователи не должны знать о том, что эти части подверглись изменению, или что добавлены новые части для поддержания работы распределенной системы.

Надежность распределенной системы является важной характеристикой, определяющей вероятность того, что программная система будет работать по спецификации. Ненадежность компонентов, осуществляющих передачу информации, может заключаться в полном прекращении передачи, в одностороннем прекращении передачи, в возникновении случайных ошибок или помех при передаче.

Для того, чтобы получить представление различных компьютеров и сетей в виде единой системы, разработка распределенных систем часто включает в себя особый уровень программного обеспечения, который находится между самым верхним уровнем, на котором присутствуют пользователи, и нижним уровнем, который состоит из низкоуровневых операционных систем (рисунок 1).



Рисунок 1 – Распределенная система организована в виде службы промежуточного уровня

Классическим примером распределенной системы является World Wide Web. Всемирная паутина представляет единообразную, простую и целостную модель распределенных документов. Для того, чтобы увидеть документ, пользователю необходимо активизировать ссылку, после чего документ отобразится на экране. Отпадает необходимость знать, с какого сервера доставляется документ, достаточно лишь информации о том, где он расположен. Публикация документа тоже является достаточно простой операцией, требуется задать ему уникальное имя в форме унифицированного указателя ресурса, которое ссылается на локальный файл с содержимым документа.

Основные способы анализа надежности распределенных систем. Распределенная система состоит из модулей системы, которые в свою очередь состоят из компонентов.

Компоненты могут иметь:

1. Разную надежность.
2. Разную зависимость между компонентами.

Надежность системы – это функция надежности компонентов и зависимостей между компонентами.

Надежность последовательных систем, состоящих из множества компонентов, соединенных друг с другом, определяется вероятностью отказа каждого компонента. Отказ каждого компонента приводит к отказу всей системы. Надежность системы может быть выражена через надежность ее компонентов, если они отказывают независимо. Для этого используют следующую формулу:

$$R = \prod_{k=1}^{Q_p} R_k,$$

где Q_p – число компонентов, R_k – надежность k -го компонента, которые должны быть заданы в одном интервале.

Используя связь между надежностью и частотой ошибок, что выражается формулой:

$$\lambda = \frac{-\ln R}{\tau} \leftrightarrow R = e^{-\lambda\tau},$$

получаем что:

$$\lambda = \sum_{k=1}^{Q_p} \lambda_k,$$

где λ_k – частота ошибок k -го компонента, из чего можно сделать вывод, что общая частота отказа системы есть сумма частот ошибок отдельных ее компонентов. Отсюда следует вывод, что при последовательной связи компонентов распределенной системы вероятность безотказной работы уменьшается.

Надежность параллельных распределенных систем, состоящих из n компонентов, работающих параллельно, определяется вероятностью отказа всех компонентов одновременно. В таком случае вероятность отказа системы можно найти по формуле:

$$F(t) = 1 - R(t),$$

где F – вероятность отказа системы, R – вероятность безотказной работы.

Тогда вероятность надежности параллельной распределенной системы можно найти по формуле:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)),$$

где F_i – вероятность отказа компонента параллельной системы, R_i – вероятность безотказной работы компонента системы.

Из приведенных выше формул можно сделать вывод, что надежность системы с параллельными компонентами значительно выше надежности отдельного компонента. Параллельное соединение – метод создания надежной распределенной системы из ненадежных компонентов.

Алгоритмы повышения надежности. На сегодняшний день существует несколько весомых алгоритмов, способных решать проблемы надежности [4]. Задача принятия консенсуса является одной из основополагающих для современных распределенных систем. Задача достижения консенсуса – это задача получения согласованного значения группой участников, члены которой называются узлами, в ситуации, когда возможны отказы отдельных участников, предоставление им некорректной информации и искажение переданных значений средой передачи данных.

Случай нетипичного функционирования компонентов распределенной системы можно охарактеризовать полным отказом компонента, который приводит к полной его недоступности, и византийской ошибкой – компонент продолжает работать, но при этом возвращает неверную информацию. Например, использование оперативной памяти без функции коррекции ошибок может привести к получению фиктивных данных из памяти, а ошибки оборудования могут приводить к изменению или повреждению пакетов данных.

Консенсус должен удовлетворять следующим условиям:

1. Согласованность – все узлы принимают одно значение.
2. Корректность – значение из тех, что предложено.
3. Конечность – каждый узел принимает решение за конечное число шагов.

Простейший способ реализовать распределенную систему – создать набор клиентов, которые посылают команды центральному серверу. Сервер должен быть описан как детерминированный конечный автомат, который выполняет в определенном порядке команды от клиентов.

Примером такой системы является банковская, где клиентами могут быть клерки, а состояние центрального узла может состоять из счетов и балансов пользователей банка. Снятие наличных могло бы быть выполнено через выполнение конечным автоматом команды, которая уменьшала бы баланс определенного счета, когда баланс был бы больше суммы снятия, а затем генерировала бы старый и новый баланс в качестве результата обработки команды.

Реализация, которая использует центральный сервер, не является отказоустойчивой, так как в случае отказа система перестанет обрабатывать команды клиентов. Для обеспечения отказоустойчивости системе следует использовать набор серверов, каждый из которых представляет собой конечный автомат. Клиент, для которого выполняется команда, может использовать любой сервер.

Распределенные автоматы реализуются с помощью реплицированного журнала. На каждом сервере хранится журнал, содержащий последовательность команд, которые его собственный конечный автомат выполняет в постоянном порядке.

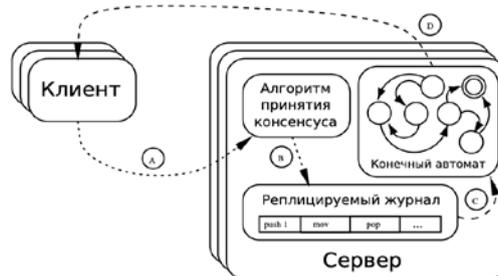


Рисунок 2 – Архитектура системы с использованием распределенного конечного автомата

Алгоритмы принятия консенсуса при практическом применении обладают следующими свойствами:

1. Обеспечивают безопасность при всех условиях, в том числе при задержках, потерях сообщений, их дублировании.
2. Высокая доступность серверов.
3. Команда считается выполненной только после подтверждения успешного ее выполнения. Меньшинство медленных узлов не должно повлиять на общую производительность системы.

Заключение. За последнее десятилетие распределенные системы набирают все большую популярность. В первую очередь это связано с тем, что процесс разработки таких систем намного быстрее монолитных в силу того, что компоненты систем могут разрабатываться независимо друг от друга разными людьми и даже командами, достаточно лишь того, чтобы соблюдался единый протокол общения между компонентами. Независимые компоненты системы просто тестировать и переиспользовать в разных частях системы. Важную роль играет возможность масштабируемости и отказоустойчивости. Современные алгоритмы принятия консенсуса позволяют создавать надежные распределенные системы, которые могут использоваться в банковских, аэрокосмических и других сложных отраслях, в которых критически важно соблюдение безотказной работы.

Литература

1. Котляров, В. П. Проектирование отказоустойчивых распределенных информационных систем / В. П. Котляров. – СПб. : ОРЕЛЛИ, 2019. – 210 с.
2. Силен, Д. Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных / Д. Силен. – СПб. : ОРЕЛЛИ, 2017. – 336 с.
3. Бринк, Х. Машинное обучение / Х. Бринк. – СПб. : ДМК, 2017. – 336 с.
4. Клеппман, М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка / М. Клеппман. – СПб. : ОРЕЛЛИ, 2018. – 640 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 09.04.2021

Асимптотические свойства тригонометрических аппроксимаций Паде

А.П. СТАРОВОЙТОВ¹, Е.П. КЕЧКО¹, А.Ф. КАСАБУЦКИЙ²

Для тригонометрической аппроксимации Паде $\pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$ функции $h_\gamma = \sum_{k=0}^{\infty} (\sin kx + \cos kx) / (\gamma)_k$,

где $(\gamma)_k = \gamma(\gamma+1)\dots(\gamma+k-1)$ найдена асимптотика убывания разности $h_\gamma(x) - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$ в случае, когда $0 \leq m \leq m(n)$, $m(n) = o(n)$ и $n \rightarrow \infty$.

Ключевые слова: аппроксимации Паде, асимптотические равенства, наилучшие равномерные приближения, тригонометрические аппроксимации.

For trigonometric Padé approximation $\pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$ of the function $h_\gamma = \sum_{k=0}^{\infty} (\sin kx + \cos kx) / (\gamma)_k$, where

$(\gamma)_k = \gamma(\gamma+1)\dots(\gamma+k-1)$ the asymptotic behavior of the decrease in the difference $h_\gamma(x) - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$ was found in case, when $0 \leq m \leq m(n)$, $m(n) = o(n)$ and $n \rightarrow \infty$.

Keywords: Padé approximations, asymptotic equalities, best uniform approximation, trigonometric Padé approximations.

Введение. Пусть $f \in C_{2\pi}$, т. е. является вещественной непрерывной 2π -периодической функцией, представимой на прямой своим рядом Фурье

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad (1)$$

где коэффициенты Фурье a_k и b_k – действительные числа.

Через $\mathcal{R}_{n,m}^t$ обозначим класс всех рациональных тригонометрических функций

$$r^t(x) = \frac{p_n^t(x)}{q_m^t(x)},$$

где $p_n^t(x)$, $q_m^t(x)$ – тригонометрические многочлены с действительными коэффициентами и $\deg p_n^t \leq n$, $\deg q_m^t \leq m$. Определим наилучшие равномерные рациональные тригонометрические приближения f в классе $\mathcal{R}_{n,m}^t$, полагая

$$R_{n,m}^t := \inf \{ \|f - r^t\| : r^t \in \mathcal{R}_{n,m}^t \},$$

а $\|g\| = \max_{x \in \mathbb{R}} |g(x)|$.

Тригонометрической аппроксимацией Паде функции f , заданной рядом (1), назовем такую непрерывную на \mathbb{R} рациональную дробь $\pi_{n,m}^t(x)$ из класса $\mathcal{R}_{n,m}^t$, которая представима своим рядом Фурье и имеет максимально возможный (по числу свободных параметров) порядок касания к ряду (1), т. е.

$$f(x) - \pi_{n,m}^t(x) = \sum_{k=n+m+1}^{\infty} (\tilde{a}_k \cos kx + \tilde{b}_k \sin kx),$$

где \tilde{a}_k , \tilde{b}_k – действительные числа. Заметим, что в случае произвольного ряда Фурье (1) тригонометрические аппроксимации Паде могут не существовать (см. [1]).

Пусть параметр $\gamma \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}_-$, $\mathbb{Z}_- = \{0, -1, -2, \dots\}$. Рассмотрим семейство функций $\mathcal{H}^t = \{h_\gamma\}$, представимых в виде

$$h_\gamma(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin kx + \cos kx}{(\gamma)_k}.$$

В данной работе исследуется поведение тригонометрических аппроксимаций Паде функции h_γ . В частности, найдена асимптотика убывания разности $h_\gamma - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$, а также описаны асимптотики поведения величин $R_{n,m}^t(h_\gamma)$ при $n + m \rightarrow \infty$. При более ограничительных условиях аналогичные результаты ранее были получены в работе [2]. Предложенный нами метод доказательства существенно отличается от метода работы [2]. Заметим также, что близкие по содержанию результаты были получены в работах [3]–[5] для функций

$$G_\gamma = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos kx}{(\gamma)_k} \quad \text{и} \quad H_\gamma = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin kx}{(\gamma)_k}.$$

Основные результаты.

Теорема 1. Пусть $h_\gamma \in \mathcal{H}^t$. Тогда для любых целых неотрицательных n и m тригонометрические аппроксимации Паде $\pi_{n,m}^t(z; h_\gamma)$ существуют и равномерно по всем $x \in \mathbb{R}$ и m , $n \geq m - 1$, при $n \rightarrow \infty$

$$h_\gamma - \pi_{n,m}^t(z; h_\gamma) = \frac{(-1)^m m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}} \operatorname{Re} \left\{ (1-i) e^{2mz/(n+m)} z^{n+m+1} (1+o(1)) \right\}.$$

Доказательство. Рассмотрим алгебраические аппроксимации Паде $\pi_{n,m}(z; F_\gamma)$ функций Миттаг-Леффлера

$$F_\gamma(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{(\gamma)_k}.$$

В работе [6] доказано, что при $\gamma \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}_-$ для целых неотрицательных n и m аппроксимации Паде $\pi_{n,m}(z; F_\gamma)$ существуют и являются рациональными дробями вида

$$\pi_{n,m}(z) = \pi_{n,m}(z; F_\gamma) = \frac{P_n(z)}{Q_m(z)} = \frac{\sum_{k=0}^n p_k z^k}{\sum_{k=0}^m q_k z^k},$$

где $p_k, q_k \in \mathbb{R}$ и равномерно по всем $|z| \leq 1$ и m , $n \geq m - 1$ и при $n \rightarrow \infty$

$$F_\gamma(z) - \pi_{n,m}(z; F_\gamma) = \frac{(-1)^m m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}} e^{2mz/(n+m)} z^{n+m+1} (1+o(1)). \tag{2}$$

Доказательство теоремы 1 опирается на следующую лемму (см. [7, с. 345]).

Лемма. Пусть

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx).$$

Положим $c_k = a_k - ib_k$ (i – мнимая единица), и рассмотрим функцию

$$F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k.$$

Тогда при $z = e^{ix}$ функция $f(x) = \operatorname{Re}\{F(z)\}$, а

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{\pi_{n,m}(z; F)\} &= \\ &= \frac{\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m \left\{ \operatorname{Re}(p_j \bar{q}_k) \cos(j-k)x - \operatorname{Im}(p_j \bar{q}_k) \sin(j-k)x \right\}}{\sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m \left\{ \operatorname{Re}(q_j \bar{q}_k) \cos(j-k)x - \operatorname{Im}(q_j \bar{q}_k) \sin(j-k)x \right\}}, \end{aligned}$$

где числитель и знаменатель $\pi_{n,m}(z; F)$ имеют вид

$$P_n(z; F) = \sum_{j=0}^n p_j z^j, \quad Q_m(z; F) = \sum_{j=0}^m q_j z^j.$$

Возьмем в лемме 1 в качестве $f(x)$ функцию $h_\gamma(x)$. Тогда при $z = e^{ix}$

$$h_\gamma(x) = \operatorname{Re}\{(1-i)F_\gamma(z)\},$$

а (3) примет вид

$$\operatorname{Re}\{\pi_{n,m}(z; (1-i)F_\gamma)\} = \frac{\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m p_j q_k [\cos(j-k)x + \sin(j-k)x]}{\sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m q_j q_k \cos(j-k)x}. \quad (4)$$

Умножая правую и левую части (2) на $(1-i)$, а затем, выделяя из них действительные части, при $z = e^{ix}$ получим

$$h_\gamma(x) - \operatorname{Re}\{\pi_{n,m}(z; (1-i)F_\gamma)\} = \frac{(-1)^m m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}} \operatorname{Re}\{(1-i)e^{2mz/(n+m)} z^{n+m+1} (1+o(1))\}.$$

Из представления (4) и последнего равенства следует, что

$$\pi_{n,m}^t(x; h_\gamma) = \operatorname{Re}\{\pi_{n,m}(z; (1-i)F_\gamma)\}.$$

Теорема 1 доказана.

Напомним, что бесконечно малые (б.м.) величины $\{\alpha_n\}_{n=0}^\infty$, $\{\beta_n\}_{n=0}^\infty$ называются эквивалентными ($\alpha_n \sim \beta_n$), если $\alpha_n / \beta_n \rightarrow 1$ при $n \rightarrow \infty$. Если существуют положительные постоянные A и B , для которых $A\alpha_n \leq \beta_n \leq B\alpha_n$, при $n = 0, 1, 2, \dots$, то говорят, что б.м. α_n и β_n имеют одинаковый порядок при $n \rightarrow \infty$ ($\alpha_n \asymp \beta_n$).

Теорема 2. Пусть $h_\gamma \in \mathcal{H}^t$. Тогда если $m(n) = o(n)$, то равномерно по всем m , $0 \leq m \leq m(n)$, при $n \rightarrow \infty$

$$R_{n,m}^t(h_\gamma) \sim \|h_\gamma - \pi_{n,m}^t(\cdot; h_\gamma)\| \sim \frac{\sqrt{2} m! |(\gamma)_n|}{|(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}|}.$$

Равномерно по всем m , $n \geq m-1$ и $n \rightarrow \infty$

$$R_{n,m}^t(h_\gamma) \asymp \|h_\gamma - \pi_{n,m}^t(\cdot; h_\gamma)\| \asymp \frac{\sqrt{2} m! |(\gamma)_n|}{|(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}|}.$$

Доказательство. Предположим, что $m(n) = o(n)$ и $0 \leq m \leq m(n)$. Тогда из теоремы 1 следует, что

$$h_\gamma - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma) = \frac{(-1)^m m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}} \operatorname{Re}\{(1-i)e^{i(n+m+1)x} (1+o(1))\}. \quad (5)$$

Пусть

$$\varphi(x) = \frac{(-1)^m m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}} (1-i)e^{i(n+m+1)x}.$$

В дальнейших рассуждениях будем учитывать, что $(1-i)e^{i(n+m+1)x} = \cos(n+m+1)x + \sin(n+m+1)x - i[\cos(n+m+1)x - \sin(n+m+1)x]$. Опираясь на (5) легко показать, что при достаточно больших n знак разности $h_\gamma(x) - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$ совпадает со знаком $\operatorname{Re}\varphi(x)$. Когда x пробегает весь промежуток $[0, 2\pi)$, точка $(n+m+1)x$ пробегает весь полуинтервал $[0, 2\pi(n+m+1))$. Поэтому существуют $2(n+m+1)$ таких действительных чисел x_j , $j = \overline{1, 2(n+m+1)}$, что

$$0 \leq x_1 < x_2 < \dots < x_{2(n+m+1)} < 2\pi,$$

$$\varphi(x_j) = \frac{(-1)^{m+j-1} \sqrt{2} m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}}.$$

Следовательно, в точках x_j разность $h_\gamma(x_j) - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)$ принимает значения с чередующимися знаками. В таком случае, согласно рациональному аналогу известной теоремы Валле Пуссена (см., например, [8]),

$$R_{n,m}^t(h_\gamma) \geq \min_{1 \leq j \leq 2(n+m+1)} |h_\gamma(x_j) - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)| \geq \frac{\sqrt{2} m! |(\gamma)_n|}{|(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}|} (1 - |o(1)|).$$

С другой стороны

$$R_{n,m}^t(h_\gamma) \leq \max_{x \in \mathbb{R}} |h_\gamma(x) - \pi_{n,m}^t(x; h_\gamma)| \leq \frac{\sqrt{2} m! |(\gamma)_n|}{|(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}|} (1 + |o(1)|).$$

Таким образом, первая часть теоремы 2 доказана. Вторая её часть доказывается аналогично.

Заключение. Теоремы 1 и 2 при более ограничительных условиях $m(n) = o(n^{2/3})$ ранее были доказаны в работе [2]. Метод работы [2] опирается на детерминантные представления числителя и знаменателя дроби Паде $\pi_{n,m}^t(x)$, которые были получены в [1], в то время как приведенные доказательства теорем 1 и 2 основаны на связи алгебраических и тригонометрических аппроксимаций Паде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

Литература

1. Лабыч, Ю. А. Тригонометрические аппроксимации Паде функций с регулярно убывающими коэффициентами Фурье / Ю. А. Лабыч, А. П. Старовойтов // Математический сборник. – 2009. – Т. 200, № 7. – С. 107–130.
2. Лабыч, Ю. А. Об асимптотике поведения тригонометрических аппроксимаций Паде одного класса функций / Ю. А. Лабыч, А. П. Старовойтов // Вестник ГрДУ імя Я.Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і ўпраўленне. Біялогія. – 2009. – № 1 (77). – С. 78–88.
3. Лабыч, Ю. А. О рациональной аппроксимации периодических функций / Ю. А. Лабыч // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2009. – № 3. – С. 77–86.
4. Лабыч, Ю. А. Приближение непрерывных функций рациональными дробями Паде-Чебышева / Ю. А. Лабыч, А. П. Старовойтов // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 1 (6). – С. 69–78.
5. Старовойтов, А. П. Аппроксимации Паде специальных функций / А. П. Старовойтов, Н. А. Старовойтова, Н. В. Рябченко // Український математичний вісник. – 2012. – Т. 9, № 2. – С. 246–258.
6. Старовойтов, А. П. Аппроксимации Эрмита-Паде функций Миттаг-Леффлера / А. П. Старовойтов, Н. А. Старовойтова // Математический сборник. – 2007. – Т. 198, № 7. – С. 109–122.
7. Бейкер, Дж. мл. Аппроксимации Паде. 1. Основы теории. 2. Обобщения и приложения / Дж. Бейкер мл., П. Грейвс-Моррис. – М. : Мир, 1986. – 502 с.
8. Lorentz, G. G. Constructive Approximation, Advanced problems / G. G. Lorentz, M. v Golitschek, Y. Makovoz. – New York, Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1996. – 651 p.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

УДК 539.12.01

Критические значения расширения Фридрикса релятивистской кулоновской задачи

В.В. АНДРЕЕВ

В работе представлена методика расчета критических значений параметра кулоновского потенциала α на основе решения бесспинового уравнения Солпитера в импульсном пространстве. В предлагаемой методике вычисление α_{crit} сводится к задаче собственные значения. Для бесспинового уравнения Солпитера с $m = 0$ получены новые аналитические выражения α_{crit} основного состояния с произвольным орбитальным моментом ℓ . Проведен численный расчет критических значений α_{crit} для уравнения Солпитера с $m \neq 0$.

Ключевые слова: уравнение Солпитера, импульсное пространство, гамильтониан, кулоновский потенциал.

The paper presents a technique for calculating the critical values of the parameter α of the Coulomb potential based on the solution of the spinless Salpeter equation in momentum space. In the proposed method, the calculation of α_{crit} is reduced to an eigenvalue problem. For the spinless Salpeter equation with $m = 0$, new analytical expressions α_{crit} of the ground state with an arbitrary orbital angular momentum ℓ are obtained. A numerical calculation of the critical values of α_{crit} for the Salpeter equation with $m \neq 0$ is carried out.

Keywords: Salpeter equation, momentum space, Hamiltonian, Coulomb potential.

Введение. Для вычисления характеристик двухчастичных связанных квантовых систем используют уравнения вида

$$H|\Phi\rangle = E|\Phi\rangle, \quad (1)$$

где H – оператор Гамильтона (гамильтониан), $E > 0$ – полная энергия связанной системы, которая описывается волновой функцией Φ . При этом гамильтониан в многих случаях можно представить в виде, разделив кинетическую и потенциальную части:

$$H = T(k) + V(\mathbf{r}, \eta). \quad (2)$$

Здесь $V(\mathbf{r}, \eta)$ статический потенциал взаимодействия частиц, зависящий от координаты \mathbf{r} и некоторого набора параметров $\eta = \{\alpha, \sigma, \dots\}$, которые характеризуют интенсивность взаимодействия частиц с другом; часто потенциал считается центральным, т. е. зависит только от радиальной координаты $r = |\mathbf{r}|$.

Оператор кинетической энергии $T(k)$ в случае полурелятивистской кинематики определяется соотношением ($\hbar = c = 1$)

$$T(k) = \sum_{i=1}^2 \sqrt{k^2 + m_i^2}, \quad k = |\mathbf{k}|, \quad (3)$$

где $m_{1,2}$ – массы частиц, образующих систему. В нерелятивистском пределе имеем

$$T(k) = \sum_{i=1}^2 \frac{k^2}{2m_i} + m_i. \quad (4)$$

Очень часто для выявления характерных особенностей уравнения (1) используют «одночастичный» вариант оператора $T(k)$

$$T(k, m) = \sqrt{k^2 + m^2} . \tag{5}$$

Уравнение (1) с оператором (3) или (5) (бесспиновое уравнение Солпитера) обычно используется, когда нельзя пренебречь кинетическими релятивистскими эффектами [1]. Заметим, что аналогичное уравнение появляется в рамках пуанкаре-инвариантной квантовой механики [2]. Это уравнение используют при описании спектроскопии мезонов в рамках потенциальных моделей [3]. Обзор некоторых аспектов «полурелятивистского» описания связанных состояний можно найти в работе [4].

Из-за псевдодифференциальной природы оператора кинетической энергии для уравнения (1) трудно найти точные аналитические результаты. Большинство этих результатов было получено для кулоновского потенциала с константой взаимодействия α

$$V(|\mathbf{r}|) = -\frac{\alpha}{r} \tag{6}$$

и являются приближенными. Например, в работах [4]–[6] найдены аналитические оценки верхней и нижней границы уровней основного состояния энергии, а также проведены численные расчеты возможных спектров для различных потенциалов [4]–[7].

Требование положительности полной энергии E для гамильтониана H приводит к условию вида (расширение Фридрихса)

$$E(\eta) = \frac{\langle \Phi | H(\eta) | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle} \geq 0 . \tag{7}$$

Уравнение (7) определяет ограничения на набор параметров потенциала взаимодействия η , при которых существует дискретный спектр оператора H . Значения параметров $\eta_{\text{crit.}}$, при которых $E(\eta_{\text{crit.}}) = 0$, называют критическими.

Одной из интересных задач, связанных с решением уравнения (1) с кулоновским потенциалом (6), является существование критического значения $\alpha_{\text{crit.}}$ параметра α , при котором дискретный спектр связанной системы перестает существовать (при этом энергия системы $E(\alpha_{\text{crit.}}) = 0$).

По теме существования критического значения и его оценки имеются многочисленные работы, начиная с работы [8]. Чаще всего, с помощью вариационных методов вычислялось аналитическое выражение для верхней границы энергии E , а затем из него извлекалось критическое значение константы взаимодействия α .

В данной работе излагается новая методика получения критических значений кулоновской задачи на основе уравнения (1) в импульсном пространстве. Будут получены аналитические и численные значения $\alpha_{\text{crit.}}$ в безмассовом пределе и для варианта с $m \neq 0$.

Бесспиновое уравнение Солпитера в импульсном пространстве. Для поиска критических значений используем «одночастичный» вариант оператора кинетической энергии (5).

Уравнение (1) для центрально-симметричных потенциалов после частичного разложения примет вид:

$$T(k, m)\Phi_{n\ell}(k) + \int_0^\infty V_\ell(k, k')\Phi_\ell(k')k'^2 dk' = E_{n\ell}\Phi_{n\ell}(k) , \tag{8}$$

где $\Phi_{n\ell}(k)$ – радиальная часть фурье-образа волновой функции в координатном представлении; $V_\ell(k, k')$ – оператор ℓ -той составляющей частичного разложения потенциала взаимодействия.

Для кулоновского потенциала (6) импульсное представление имеет вид

$$V_\ell(k, k') = -\frac{\alpha}{\pi} \frac{Q_\ell(y)}{kk'} . \tag{9}$$

Здесь y – комбинация импульсов

$$y = \frac{k^2 + k'^2}{2kk'}, \quad (10)$$

функция $Q_\ell(y)$ – полином Лежандра 2-го рода:

$$Q_\ell(y) = P_\ell(y)Q_0(y) - w_{\ell-1}(y), \quad (11)$$

$$Q_0(y) = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+y}{1-y} \right|; \quad w_{\ell-1}(y) = \sum_{n=1}^{\ell} \frac{1}{n} P_{n-1}(y) P_{\ell-n}(y), \quad (12)$$

где $P_\ell(y)$ – полином Лежандра 1-го рода.

Уравнение (8) с помощью замен

$$\begin{aligned} k &= \beta \tilde{k}, & \phi_{n\ell}(\tilde{k}) &= \beta^{1/2} k \Phi_{n\ell}(k), \\ E_{n\ell} &= \beta \varepsilon_{n\ell}, & m_\beta &= m / \beta, \quad \beta > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

трансформируется к виду с безразмерными величинами:

$$\left(\varepsilon_{n\ell} - T(\tilde{k}, m_\beta) \right) \phi_{n\ell}(\tilde{k}) = -\frac{\alpha}{\pi} \int_0^\infty Q_\ell(y) \phi_{n\ell}(\tilde{k}') d\tilde{k}'. \quad (14)$$

Однако описание связанных состояний в импульсном представлении усложняется необходимостью решения интегрального уравнения (8), содержащего сингулярные члены, тип которых определяется видом $V_\ell(k, k')$. Поскольку функция Q_ℓ сингулярная, поэтому в данном случае требуются специальные методы решения.

Рассмотрим методы решения уравнения (14) с кулоновским потенциалом, имеющим логарифмическую сингулярность. Численное решение интегрального уравнения (8) может быть сведено к задаче на собственные значения для матрицы, которая возникает при использовании квадратурных формул для интегралов, входящих в уравнение.

Сначала трансформируются пределы интегрирования от $[0, \infty[$ к «стандартному» $[-1, 1]$ с помощью замены переменных

$$\int_0^\infty f(\tilde{k}) d\tilde{k} = \int_{-1}^1 f(\tilde{k}(t)) \frac{d\tilde{k}}{dt} dt. \quad (15)$$

Среди различных возможностей в литературе часто встречается вариант отображения вида:

$$\tilde{k}(t) = \beta_0 \frac{1+t}{1-t}, \quad (16)$$

где β_0 – некоторый параметр, позволяющий улучшить процесс сходимости вычислений.

Стандартный подход основан на аппроксимации интеграла (15) посредством квадратурной формулы

$$\int_0^\infty f(\tilde{k}) d\tilde{k} \approx \sum_{j=1}^N \tilde{\omega}_j f(\tilde{k}_j), \quad (17)$$

где множители $\tilde{\omega}_j$ связаны с табличными весовыми множителями ω_j для области $[-1, 1]$ соотношением: $\tilde{\omega}_j = (d\tilde{k} / dt)_j \omega_j$, а величина N задает число узлов.

В итоге, численное решение интегрального уравнения (1) может быть сведено к задаче на собственные значения для матрицы H_{ij} :

$$\sum_{j=1}^N H(\tilde{k}_i, \tilde{k}_j) \phi(\tilde{k}_j) = \sum_{j=1}^N H_{ij} \phi_j = E^{(N)} \phi_i. \quad (18)$$

Стандартные методики численного решения уравнения (8) с потенциалом (9) дают относительно невысокую точность [9], [10]. В работах [11]–[13] развиты высокоточные методы решения (8), позволяющие провести численный анализ значений α_{crit} .

В нашем случае используем модификацию уравнения (8) с помощью контрчлена, позволяющего избежать проблем с логарифмической сингулярностью потенциала (9) [12]:

$$C_\ell = \int_0^\infty \frac{Q_\ell(y)}{k} dk = \left[\frac{(\ell-1)!!}{\ell!!} \right]^2 \times \begin{cases} \pi^2/2, & \ell = 2m, m = 0, 1, 2, \dots \\ 2, & \ell = 2m+1, m = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (19)$$

Констрчлен (19) максимально удобен для вычитания и позволяет повысить точность решения по сравнению с вариантами работ [9], [14] на два порядка [12].

В итоге уравнение (14) после добавления (19), запишется в виде

$$\left(T(\tilde{k}, m_\beta) - \varepsilon_{n\ell} \right) \phi_{n\ell}(\tilde{k}) = \frac{\alpha}{\pi} \left[C_\ell \tilde{k} \phi_{n\ell}(\tilde{k}) + \int_0^\infty Q_\ell(y) \left(\phi_{n\ell}(\tilde{k}') - \frac{\tilde{k}}{\tilde{k}'} \phi_{n\ell}(\tilde{k}) \right) d\tilde{k}' \right]. \quad (20)$$

Критические значения кулоновской задачи. Используем уравнение (20) для вычисления критических значений α . Спектр гамильтониана в этом случае будет положительным при условии, если

$$0 < \alpha < \alpha_{\text{crit.}}. \quad (21)$$

Рассмотрим три варианта оператора $T(k)$ в кулоновской задаче: 1) ультрарелятивистский предел – $T(k, m=0) = k$; 2) нерелятивистское приближение – $T^{\text{NR}}(k, m) = m + k^2 / (2m)$; 3) бесспиновое уравнение Солпитера с $T(k, m) = \sqrt{k^2 + m^2}$. Обозначим критические значения для данных вариантов, как $\alpha_{\text{crit.}}^{\text{H}}$, $\alpha_{\text{crit.}}^{\text{NR}}$ и $\alpha_{\text{crit.}}^{\text{S}}$. Поскольку

$$k < \sqrt{k^2 + m^2} < m + \frac{k^2}{2m}, \quad (22)$$

то

$$\alpha_{\text{crit.}}^{\text{H}} < \alpha_{\text{crit.}}^{\text{S}} < \alpha_{\text{crit.}}^{\text{NR}}. \quad (23)$$

В случае $m = 0$, вследствие того, что $\varepsilon_{n\ell}(\alpha_{\text{crit.}}^{\text{H}}) = 0$, уравнение (20) преобразуется к виду

$$\int_0^\infty Q_\ell(y) \left(\phi_{n\ell}(\tilde{k}) / \tilde{k}' - \phi_{n\ell}(\tilde{k}') / \tilde{k} \right) d\tilde{k}' = \left(C_\ell - \frac{\pi}{\alpha_{\text{crit.}}^{\text{H}}} \right) \phi_{n\ell}(\tilde{k}). \quad (24)$$

При решении уравнения (24) использовались квадратурные формулы на основе полиномов Чебышева 1-го рода $T_n(x)$, для которых имеются аналитические выражения весовых коэффициентов и нулей. Это позволяет исследовать поведение собственных значений для матриц уравнения (24) размерности $N \times N$ для широкой области N .

Используя методику решения интегральных уравнений (смотри формулы (15)–(17)), получим задачу на собственные значения для функции $(C_\ell - \pi / \alpha_{\text{crit.}}^{\text{H}})$ вида

$$\sum_{j=1}^N W_{ij} \phi_j = \left(C_\ell - \frac{\pi}{\alpha_{\text{crit.}}^{\text{H}}} \right) \phi_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (25)$$

Матричные элементы W_{ij} уравнения (25) запишутся в виде:

$$W_{ii} = \sum_{r=1}^N \omega_r^{\text{st}} Q_\ell(y_{ri} \neq 1) \frac{\overline{dk}_r}{\overline{k}_r}, \quad H_{ij} = -\omega_j^{\text{st}} Q_\ell(y_{ij}) \frac{\overline{dk}_j}{\overline{k}_i}, \quad (i \neq j), \quad (26)$$

где для сокращения записи введены обозначения:

$$\overline{k}_i = \left(\frac{1 + \xi_{i,N}}{1 - \xi_{i,N}} \right), \quad \overline{dk}_i = \frac{1}{(1 - \xi_{i,N})^2}, \quad (27)$$

$$Q_\ell(y(z, t)) = P_\ell(y(z, t)) \log \left| \frac{1-tz}{t-z} \right| - w_{\ell-1}(y(z, t)), \quad (28)$$

$$y(z, t) = \frac{2(t-z)^2}{(1-t^2)(1-z^2)} + 1, \quad y_{ij} = y(\xi_{i,N}, \xi_{j,N}). \quad (29)$$

Нули полиномов Чебышева $T_N(x)$ и весовые множители определяются соотношениями:

$$\xi_{i,N} = \cos\left(\frac{i-1/2}{N}\pi\right), \quad \omega_i^{\text{st}} = -\frac{4}{N} \sum_{k=0}^{\lfloor(N-1)/2\rfloor} \frac{T_{2k}(\xi_{i,N})}{4k^2-1}. \quad (30)$$

Расчеты проводились в системе Wolfram Mathematica [15], а выбранная точность весовых коэффициентов и нулей была равна 90. Для проверки выполнялось вычисление энергетического спектра путем решения уравнения (20) с полученными критическими значениями α_{crit} .

В этом случае, полагаем, что числовой параметр $\beta_0 = 0,999992 \times \alpha$, который воспроизводит решение нерелятивистской задачи с кулоновским потенциалом с относительной точностью от 10^{-7} до 10^{-4} для первых трех уровней и различных ℓ [12], [13], [16].

Решение задачи (25) приводит к тому, что для основного состояния критические значения определяются соотношением

$$\alpha_{\text{crit}}^{\text{H}} = \frac{\pi}{C_\ell} = \left[\frac{\ell!!}{(\ell-1)!!} \right]^2 \times \begin{cases} 2/\pi, & \ell = 2m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \\ \pi/2, & \ell = 2m+1, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (31)$$

Ответ (31) проверен для $\ell = 0, 1, \dots, 7$. Для $\ell = 0$ имеем, что $\alpha_{\text{crit}}^{\text{H}} = 2/\pi$, что совпадает с выводом работы [8]. В таблице 1 представлены некоторые значения, полученные из формулы (31). Отметим, что для $\ell \geq 1$ критическое значение становится большим единицы, что связано с появлением вклада от центробежного потенциала.

Таблица 1 – Значения $\alpha_{\text{crit}}^{\text{H}}$ основного состояния уравнения (24)

ℓ	0	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha_{\text{crit}}^{\text{H}}$	$\frac{2}{\pi}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{8}{\pi}$	$\frac{9\pi}{8}$	$\frac{128}{9\pi}$	$\frac{225\pi}{128}$	$\frac{512}{25\pi}$	$\frac{1225\pi}{512}$

В нерелятивистском варианте оператора $T(k, m)$ критическое значение $\alpha_{\text{crit}}^{\text{NR}}$ найти сложно, поскольку энергетический спектр такого уравнения хорошо известен

$$E_{n\ell}^{\text{NR}} = m \left(1 - \frac{\alpha^2}{2(n+\ell+1)^2} \right), \quad n, \ell = 0, 1, \dots \quad (32)$$

В этом случае для $\alpha_{\text{crit}}^{\text{NR}}$ имеем, что

$$\alpha_{\text{crit}}^{\text{NR}} = \sqrt{2}(n+\ell+1). \quad (33)$$

Рассмотрим вариант бесспинового уравнения Солпитера для кулоновского потенциала. Для кулоновских взаимодействий единственной размерной величиной среди параметров этой теории является масса m взаимодействующих частиц. Следовательно, в этом случае все собственные значения энергии $E_{n\ell}$ пропорциональны m . Поэтому в уравнении (20) без потери общности положим $\beta = m$. Тогда критическое значение $\alpha_{\text{crit}}^{\text{S}}$ находится путем решения уравнения

$$\frac{\tilde{k}}{\sqrt{\tilde{k}^2+1}} \left[C_\ell \phi_{n\ell}(\tilde{k}) + \int_0^\infty Q_\ell(y) \left(\frac{\phi_{n\ell}(\tilde{k}')}{\tilde{k}} - \frac{\phi_{n\ell}(\tilde{k})}{\tilde{k}'} \right) d\tilde{k}' \right] = \frac{\pi}{\alpha_{\text{crit}}^{\text{S}}} \phi_{n\ell}(\tilde{k}). \quad (34)$$

В таблице 2 представлены отношения $\alpha_{\text{crit}}^{\text{S}} / \alpha_{\text{crit}}^{\text{H}}$ для различных значений квантовых чисел n и ℓ , полученные в результате численного расчета (34).

Таблица 2 – Значения отношения $\alpha_{\text{crit}}^{\text{S}} / \alpha_{\text{crit}}^{\text{H}}$

$\ell = 0$			
N	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$
100	1,01308578	1,11733981	1,32860675
300	1,00945533	1,08461706	1,23472381
500	1,00826293	1,07393346	1,20462677

Окончание таблицы 2

$\ell = 1$			
N	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$
100	1,00309170	1,02195779	1,07145974
300	1,00224353	1,01639418	1,04827638
500	1,00195928	1,01457764	1,04144405
$\ell = 2$			
N	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$
100	1,00094317	1,00523391	1,02752665
300	1,00076932	1,00371834	1,01760214
500	1,00069823	1,00329528	1,01473026

Анализ представленных в таблице результатов показывает, что $\alpha_{\text{crit.}}^S$ удовлетворяет соотношению (23) и возрастает с ростом n и ℓ . С другой стороны, скорее всего, $\alpha_{\text{crit.}}^S \rightarrow \alpha_{\text{crit.}}^H$ при $N \rightarrow \infty$ (асимптотически) для всех n .

Следует отметить, что $\alpha_{\text{crit.}}^S \neq \alpha_{\text{crit.}}^H$, так как решение уравнения (20) для бесспинового уравнения Солпитера дает, что $E/m = 0,484256$ при $n = \ell = 0$. Этот ответ согласуется с результатами работы [4], где получены нижняя и верхняя границы E/m . Результаты расчетов позволяют утверждать, что $\alpha = 2/\pi$ является критическим для уравнения с $T(k, m = 0)$, а не для задачи с $T(k, m \neq 0)$.

Заметим, что прямое решение уравнение (20) с подстановкой полученных критических значений показывает, что энергетический спектр чувствителен к небольшим изменениям $\alpha_{\text{crit.}}$ (меньше 10^{-4} %).

Заключение. В работе представлена методика расчета критических значений кулоновского параметра α для бесспинового уравнения Солпитера. В отличие от работ [4], [5] и др., в данном подходе не требуется вычисление энергетического спектра с последующим расчетом $\alpha_{\text{crit.}}$. В предлагаемой методике вычисление $\alpha_{\text{crit.}}$ сводится к задаче собственные значения. Для бесспинового уравнения Солпитера с $m = 0$ получены новые аналитические выражения $\alpha_{\text{crit.}}$ для основного состояния с произвольным орбитальным моментом ℓ . В частном случае, когда $\ell = 0$, полученное значение совпадает с оценкой $\alpha_{\text{crit.}}$ работы [8].

Проведен численный расчет критических значений $\alpha_{\text{crit.}}^S$ для уравнения Солпитера с $m \neq 0$. Показано, что в данном случае вычисление энергетического спектра становится численно нестабильным в области $\alpha_{\text{crit.}}^S$, в отличие от варианта с $m = 0$.

Литература

1. Salpeter, E. E. Mass-corrections to the fine structure of Hydrogen-like atoms/ E. E. Salpeter// Phys. Rev. – 1952. – Vol. 87, № 2. – P. 328–343.
2. Keister, B. D. Relativistic Hamiltonian dynamics in nuclear and particle physics/ B. D. Keister, W. N. Polyzou// Adv. Nucl. Phys. – 1991. – Vol. 20. – P. 225–479.
3. Андреев, В. В. Пуанкаре-ковариантные модели двухчастичных систем с квантовополевыми потенциалами/ В. В. Андреев. – Гомель : Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2008. – 294 с.
4. Lucha, W. Semirelativistic treatment of bound states/ W. Lucha, F. F. Schoberl // Int. J. Mod. Phys. – 1999. – Vol. A14. – P. 2309–2334.
5. Lucha, W. The One-dimensional spinless relativistic Coulomb problem / W. Lucha, F. F. Schoberl // J. Math. Phys. – 2000. – Vol. 41. – P. 1778–1787.
6. Hall, R. L. Discrete spectra of semirelativistic Hamiltonians / R. L. Hall, W. Lucha, F. F. Schoberl // Int. J. Mod. Phys. – 2003. – Vol. A18. – P. 2657–2680.
7. Lucha, W. The Spinless Relativistic Yukawa Problem / W. Lucha, F. F. Schöberl// Int. J. Mod. Phys. A. – 2014. – Vol. 29, № 31. – P. 1450195.

8. Herbst, I. W. Spectral theory of the operator $(p^2 + m^2)^{1/2} - Ze^2 / r$ / I. W. Herbst // Communications in Mathematical Physics. – 1977. – Vol. 53, № 3. – P. 285–294. – ibid. 55 (1977) 316 (addendum).
9. Tang, A. The Nyström plus correction method for solving bound state equations in momentum space / A. Tang, J. W. Norbury // Phys. Rev. – 2001. – Vol. E63. – P. 066703.
10. Norbury, J. W. Confining potential in momentum space / J. W. Norbury, D. E. Kahana, K Maung // Can. J. Phys. – 1992. – Vol. 70. – P. 86–89.
11. Андреев, В. В. Квантовые и релятивистские эффекты для двухчастичных систем с корнелльским потенциалом / В. В. Андреев, К. С. Бабич // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3 (8). – С. 7–14.
12. Andreev, V. Precision solution of the Schrödinger equation with Coulomb and linear confining potentials in momentum space / V. Andreev // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2017. – Vol. 14, № 1. – P. 66–76.
13. Андреев, В. В. Прецизионные методы решения уравнения Шрёдингера с сингулярными потенциалами в импульсном пространстве / В. В. Андреев // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2019. – № 1. – С. 97–109.
14. Norbury, J. W. Exact numerical solution of the spinless Salpeter equation for the Coulomb potential in momentum space / J. W. Norbury, K. M. Maung, D. E. Kahana // Phys. Rev. A. – 1994. – Vol. 50. – P. 3609–3613.
15. Wolfram, S. The Mathematica Book : Wolfram Research / S. Wolfram. – 5th edition. – Place unknown : Wolfram Media, 2003. – 1488 p. – ISBN 1–57955–022–3.
16. Andreev, V. V. On solving the Schrödinger equation with hypersingular kernel in momentum space / V. V. Andreev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2016. – № 1 (26). – P. 7–10.

Фазовый состав и микроструктура тонких пленок $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$

А.В. Станчик¹, С.М. БАРАЙШУК², Д.В. ЖИГУЛИН³, А.Н. ПЕТЛИЦКИЙ³, Е.Л. ТРУХАНОВА¹, В.А. ЧУМАК¹

Тонкие пленки $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CZTSSe) получены путем селенизации послойно нанесенных прекурсоров Cu/Sn/ZnS магнетронным напылением на подложки Mo/стекло и из чистого стекла. С помощью рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии установлено влияние элементного состава прекурсоров и типа подложек на формирование пленок CZTSSe.

Ключевые слова: прекурсор, тонкие пленки, CZTSSe, микроструктура, параметры шероховатости.

$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CZTSSe) thin films were obtained by selenization of layer-by-layer Cu/Sn/ZnS precursors by magnetron sputtering on Mo/glass and glass substrates. The influence of the elemental composition of precursors and the type of substrates on the formation of CZTSSe films was established using X-ray spectral microanalysis, X-ray phase analysis, scanning electron and atomic force microscopy.

Keywords: precursor, thin films, CZTSSe, microstructure, roughness parameters.

Введение. Кестерит $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CZTSSe) является перспективным светопоглощающим материалом для использования в тонкопленочных солнечных элементах (СЭ) благодаря прямой запрещенной зоне (1,0–1,5 эВ), высокому коэффициенту поглощения ($> 10^4 \text{ см}^{-1}$), высокой теоретической эффективности (~30 %) и потенциальной дешевизне [1], [2]. CZTSSe состоит из широко распространенных, недорогих и малотоксичных составляющих элементов, что делает его потенциальным кандидатом на замену традиционных тонкопленочных материалов $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}(\text{S},\text{Se})_2$ и CdTe, содержащих дорогие и токсичные элементы [1]. Достигнутая эффективность СЭ на основе пленок CZTSSe составляет 12,6 % [3], что пока ниже теоретически возможной (~30 %) [2] и существующих СЭ [3]. Причиной отставания эффективности принято считать дефицит напряжения холостого хода (V_{OC}) [4]–[6]. Одной из гипотетических причин низкого значения V_{OC} является наличие большого количества дефектов и/или разупорядочения внутри CZTSSe, а также наличие побочных фаз [5], [6]. Поэтому требуется контроль формирования пленок CZTSSe с целью получения однофазного состава с минимальным количеством дефектов.

Для синтеза тонких пленок CZTSSe применяются вакуумные и невакуумные методы с одно- или двухступенчатым процессом [1]. Двухступенчатые вакуумные методы, в частности магнетронное напыление с последующим отжигом в парах халькогена, являются предпочтительными для получения пленок CZTSSe. Ключевые особенности данного метода – это точное управление стехиометрией состава, получение пленок с высокой плотностью и однородностью, а также минимальное загрязнение вакуумной камеры, что позволяет получить пленки высокого качества.

Цель данной работы – исследование фазового состава и микроструктуры тонких пленок CZTSSe, сформированных методом магнетронного напыления с последующей селенизацией на подложках стекло/Mo и из чистого стекла, в зависимости от элементного состава их прекурсоров.

Методика эксперимента. Получение прекурсоров Cu/Sn/ZnS осуществлялось в магнетронной распылительной системе (Nanovak, NVT500), снабженной тремя двухдюймовыми мишенями Cu, Sn и ZnS с чистотой 99,99 %. Последовательность нанесения слоев – стекло/(Mo)/ZnS/Sn/Cu. Во всех случаях прекурсоры напылялись общей толщиной ~1350 нм при комнатной температуре и базовом давлении в камере ~20 мТорр. Мощность распыления мишеней Cu, Sn и ZnS составляла 40, 50 и 100 Вт, соответственно. Время напыления слоев Cu, Sn и ZnS составляло 28, 30 и 60 с, соответственно. Селенизация прекурсоров Cu/Sn/ZnS осуществлялась в трехзонной трубчатой печи OFT-1200x, оборудованной диффузионным и турбонасосами, при температуре 580°C в течение 30 мин. В процессе селенизации прекурсоры были помещены в полуизолирующий кварцевый контейнер (объем 12,5 см³) с 13 мг порошкообразного Se при давлении газа Ar в 1 бар.

Данные элементного состава и морфологии синтезированных образцов были получены с помощью энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализатора «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments» (Великобритания), растровых электронных микроскопов серии ZEISS EVO и «S-4800» (Hitachi). Образцы исследовались с помощью дифрактометра ДРОН-3М с использованием CuK_α -излучения. Фазовый состав определялся путем сопоставления экспериментально измеренных данных со стандартными данными, опубликованными Crystallography Open Database (COD) при помощи программы Match. Исследование топологии проводилось на атомно-силовом микроскопе NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь).

Результаты и их обсуждение. *Микроструктура и фазовый состав прекурсоров Cu/Sn/ZnS.* В таблице 1 представлены данные элементного состава прекурсоров Cu/Sn/ZnS, нанесенных на различные подложки. Соотношения элементов прекурсоров на подложках Mo/стекло (серии **A** и **B**) и из чистого стекла (серия **B**) отличаются незначительно. Элементный состав прекурсоров серии **B** характеризуется большим содержанием олова и меньшим содержанием меди по сравнению с серией **A**.

Таблица 1 – Элементный состав прекурсоров Cu/Sn/ZnS

Серия	Подложка	Cu		Zn		Sn		S	
		ат.%	вес.%	ат.%	вес.%	ат.%	вес.%	ат.%	вес.%
A	Mo/стекло	77,54	67,04	1,94	1,74	18,89	30,51	1,63	0,71
B		73,51	62,01	2,13	1,85	22,41	35,31	1,94	0,83
B	стекло	78,62	67,81	1,56	1,39	18,85	30,37	0,96	0,42

Представленные на рисунке 1 рентгенограммы прекурсоров Cu/Sn/ZnS во всех случаях демонстрируют пики, характерные для гексагональной фазы $\text{Cu}_{6,26}\text{Sn}_5$ (COD № 00-047-1575) и тетрагональной фазы Sn (COD № 00-086-2264). В составе всех серий прекурсоров также возможно существование фаз Zn (COD № 96-151-2554), CuS_2 (COD № 00-033-0492) и SnS (COD № 00-022-0953), определение которых затруднено перекрытием их основных рефлексов с фазами $\text{Cu}_{6,26}\text{Sn}_5$ и Sn.

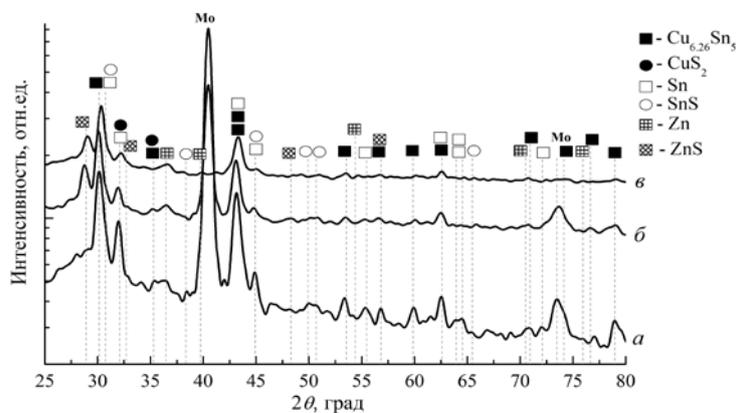


Рисунок 1 – Типичные рентгенограммы прекурсоров Cu/Sn/ZnS, нанесенных на подложки Mo/стекло (серии **A** (a) и **B** (б)) и из чистого стекла (серия **B** (в))

На рентгенограммах прекурсоров серий **B** и **B** присутствуют пики от фазы ZnS (COD № 00-005-0492). Отсутствие фазы ZnS в прекурсорах серии **A** возможно связано с меньшим содержанием цинка и серы в их составе по сравнению с прекурсорами серии **B** (таблица 1). В то время как образование ZnS в прекурсорах серии **B** обусловлено отсутствием молибденового подслоя на стеклянных подложках, и вся содержащаяся сера в составе данных прекурсоров расходуется на реакцию не только с оловом и медью, но и с цинком. На рентгенограммах прекурсоров, синтезированных на подложках Mo/стекло (серии **A** и **B**), также присутствуют пики, соответствующие молибдену (COD № 96-901-1606).

Из представленных на рисунке 2, а–в СЭМ-изображений поверхности прекурсоров Cu/Sn/ZnS видно, что во всех случаях сформирована схожая морфология. На поверхности прекурсоров серий **A** и **B** присутствуют единичные крупные зерна диаметром до 3,6 и 2 мкм,

соответственно, а также агломерированные в нитевидные образования длиной до 4 мкм более мелкие зерна диаметром $\sim 0,4$ мкм. Аналогично на поверхности прекурсоров серии **В**, нанесенных на подложки из стекла, наблюдаются единичные крупные зерна диаметром до 2 мкм и нитевидные образования длиной до 5 мкм.

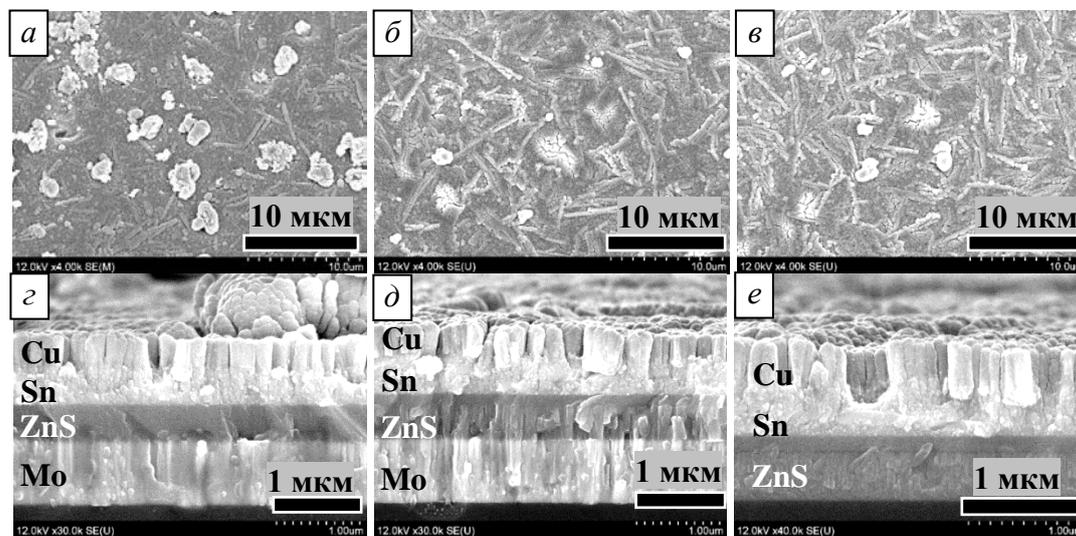


Рисунок 2 – Типичные СЭМ-изображения поверхности и поперечного скола прекурсоров Cu/Sn/ZnS , нанесенных на подложки Mo/стекло (серии **А** (а, г) и **Б** (б, д)) и из чистого стекла (серия **В** (в, е))

Во всех случаях прекурсоры Cu/Sn/ZnS демонстрируют слоистую структуру (рисунок 2, г–е), что подтверждается элементным картированием (рисунок 3). Напыляемые слои сульфида цинка, олова и меди соответствуют порядку их напыления (рисунок 3). В процессе селенизации пленок CZTSSe происходит потеря олова и цинка из-за их низкого парциального давления. Поэтому олово наносилось как подслой, чтобы предотвратить его потерю, а с целью предотвращения потери цинка использовался ZnS . Медь не осаждалась в качестве первого слоя прекурсоров, так как ее диффузия в молибденовый подслой может создавать пустоты на границе подложка-прекурсор. Толщина слоя Cu/Sn/ZnS на подложках Mo/стекло и из чистого стекла составляет $\sim 1,3$ и $1,4$ мкм, соответственно, что отвечает технологически задаваемой (~ 1350 нм). При этом толщина слоя ZnS в прекурсорах на стеклянных подложках больше, чем на подложках Mo/стекло .

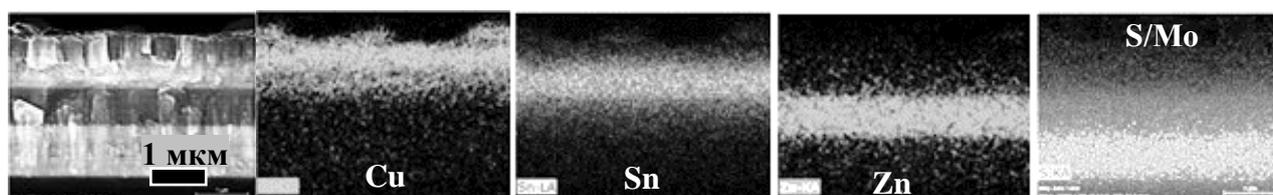


Рисунок 3 – Картирование поперечного сечения прекурсоров Cu/Sn/ZnS (серия **Б**)

Исследования показали, что сформированные на поверхности прекурсоров Cu/Sn/ZnS крупные зерна характеризуются высокой концентрацией олова и меди (рисунок 3), что может указывать на образование сплава Cu-Sn . Данный сплав включает фазы $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ ($\eta'\text{-Cu}_{6,26}\text{Sn}_5$), $\varepsilon\text{-(Cu-Sn)}$, которые способны образовываться при комнатной температуре [1], [7]. Согласно тройной фазовой диаграмме Cu-Sn-Zn , сплав между Sn и Zn отсутствует [7], [8]. Учитывая выше сказанное и результаты РФА прекурсоров Cu/Sn/ZnS (рисунок 1), можно предположить, что крупные зерна соответствуют соединению $\text{Cu}_{6,26}\text{Sn}_5$. Кроме того, на картированных изображениях поперечного скола видна взаимная диффузия меди и олова, что также может подтверждать образование сплава Cu-Sn в слоях прекурсоров. На полученных изображениях (рисунок 3) не наблюдается диффузии цинка в слой меди, что может говорить

об отсутствии образования сплава Cu-Zn (фазы Cu_5Zn_8). Диффузия серы в слой олова и наоборот, а также в слой меди обусловлены образованием бинарных сульфидов, CuS и SnS . Полученные результаты согласуются с результатами РФА (рисунок 1).

Из данных, представленных в таблице 2, видно, что параметры шероховатости поверхности прекурсоров Cu/Sn/ZnS, полученных на разных подложках, имеют близкие значения. Тем не менее, прекурсоры на подложках Мо/стекло характеризуются меньшей степенью шероховатости, чем на подложках из чистого стекла. Полученная зависимость говорит о влиянии поверхности подложек на формирование морфологии напыляемых слоев.

Таблица 2 – Значения максимальной высоты неровности рельефа (Z), средней арифметической (R_a) и квадратичной (R_q) шероховатости поверхности прекурсоров Cu/Sn/ZnS и тонких пленок CZTSSe

Серия	Подложка	Прекурсор		Тонкая пленка		
		R_a , нм	R_q , нм	R_a , нм	R_q , нм	Z , нм
A	Мо/стекло	280	333	202	253	2215
Б		225	297	109	141	1149
B	стекло	304	356	431	547	3495

Параметры шероховатости прекурсоров на подложках Мо/стекло в среднем на 7 и 22 % меньше для серий **A** и **Б**, соответственно, чем для прекурсоров на стекле (серия **B**). Меньшая степень шероховатости прекурсоров на стеклянных подложках с подслоем Мо обусловлена их более гладкой и однородной поверхностью (меньшей поверхностной плотностью нитевидных образований) по сравнению с прекурсорами на стекле без молибдена. В то же время, параметры шероховатости для прекурсоров серии **A** выше, чем для серии **Б**, что связано с формированием на их поверхности более крупных зерен и их большей поверхностной плотностью (рисунок 2 *a, б*). Следует отметить, что полученные прекурсоры Cu/Sn/ZnS имеют в 3–4 раза большие параметры шероховатости их поверхности, чем электроосажденные прекурсоры Cu/Sn/Zn на подложках Мо/стекло [9].

Микроструктура и фазовый состав тонких пленок CZTSSe. Из представленных данных в таблице 3 видно, что элементный состав синтезированных тонких пленок CZTSSe во всех случаях отличается незначительно. Соотношение элементов Cu/(Zn + Sn) указывает на обеднение медью всех серий пленок CZTSSe, а соотношение Zn/Sn – на обеднение цинком пленок серии **Б**, обогащение цинком пленок серии **B**, в то время как для пленок серии **A** соотношение Zn/Sn соответствует стехиометрии (Zn/Sn = 1,0).

Таблица 3 – Элементный состав тонких пленок CZTSSe

Серия	Подложка	Элементный состав, ат. %					Атомное соотношение элементов		
		Cu	Zn	Sn	S	Se	Cu/(Zn + Sn)	Zn/Sn	S/Se
A	Мо/стекло	25,33	13,56	13,55	5,9	41,66	0,93	1,00	0,14
Б		25,26	12,25	13,45	6,43	42,61	0,98	0,91	0,15
B	стекло	25,69	16,74	11,90	3,88	41,79	0,90	1,41	0,09

Типичные рентгенограммы пленок CZTSSe, синтезированных на различных подложках, представлены на рисунке 4. В [10] отмечено, что фаза кестерита CZTSSe близка к CZTSe и идентифицируется на рентгенограммах по ее основным рефлексам при $2\theta \approx 27,2, 45,1$ и $53,5^\circ$ (COD №96-722-0527). Во всех случаях рентгенограммы демонстрируют пики, характерные для тетрагональной фазы CZTSe (COD №96-722-0527). Основной пик при $2\theta \approx 27,2^\circ$ фазы CZTSe смещен на $27,50, 27,59$ и $27,46^\circ$ для пленок серий **A, Б** и **B**, соответственно, из-за замещения S на Se и образования твердых растворов CZTSSe. В составе пленок CZTSSe также возможно существование кубической фазы ZnSe (COD №96-900-8859), которую сложно исключить по причине близости наиболее интенсивных пиков с CZTSe.

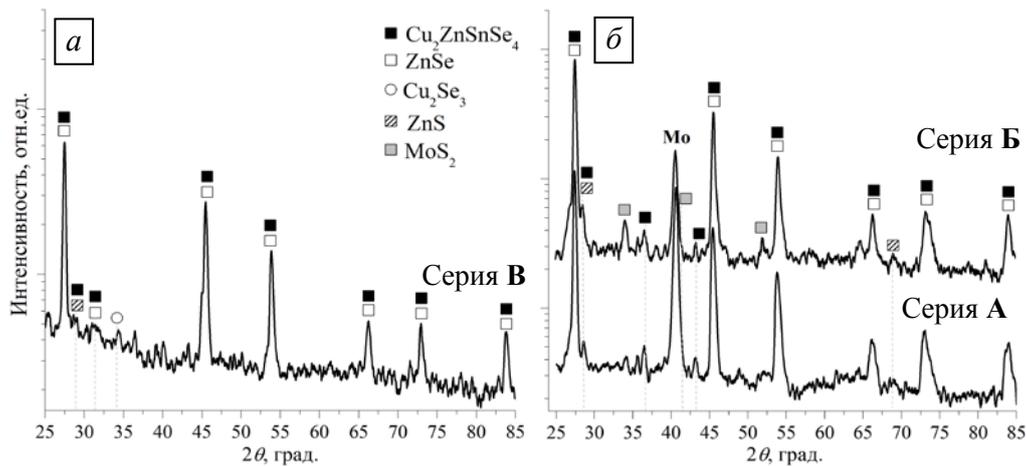


Рисунок 4 – Типичные рентгенограммы пленок CZTSSe на подложках из стекла (а) и Мо/стекло (б)

Анализ рентгенограмм пленок серии **В** указывает на возможное присутствие в их составе побочных фаз ZnS (COD № 00-002-0564) и Cu_3Se_2 (COD № 96-410-5298). Помимо рефлексов от Mo (COD № 96-901-1607) и MoS_2 (COD № 00-009-0312) на рентгенограммах пленок серий **А** и **Б** были зарегистрированы также низкоинтенсивные пики при $2\theta \approx 28,4$ и $68,9^\circ$, которые могут быть отнесены к фазе ZnS (COD № 00-002-0564).

На рисунке 5 представлены типичные СЭМ-изображения пленок CZTSSe, полученных на двух различных подложках. Как видно, структура поверхности пленок во всех случаях схожа и характеризуется плотно упакованными крупными кристаллами с незначительными пустотами. В случае пленок, синтезированных на стекле, на поверхности присутствуют крупные зерна размером до 16 мкм (рисунок 5в). Исследования РСМ показали, что состав данных зерен обогащен Cu и обеднен Sn и Zn , в то время как содержание Se близко к составу пленок (рисунок 5в). Полученный результат согласуется с данными РФА пленок серии **В** (рисунок 4а) и, тем самым, подтверждает существование фазы селенида меди в их составе.

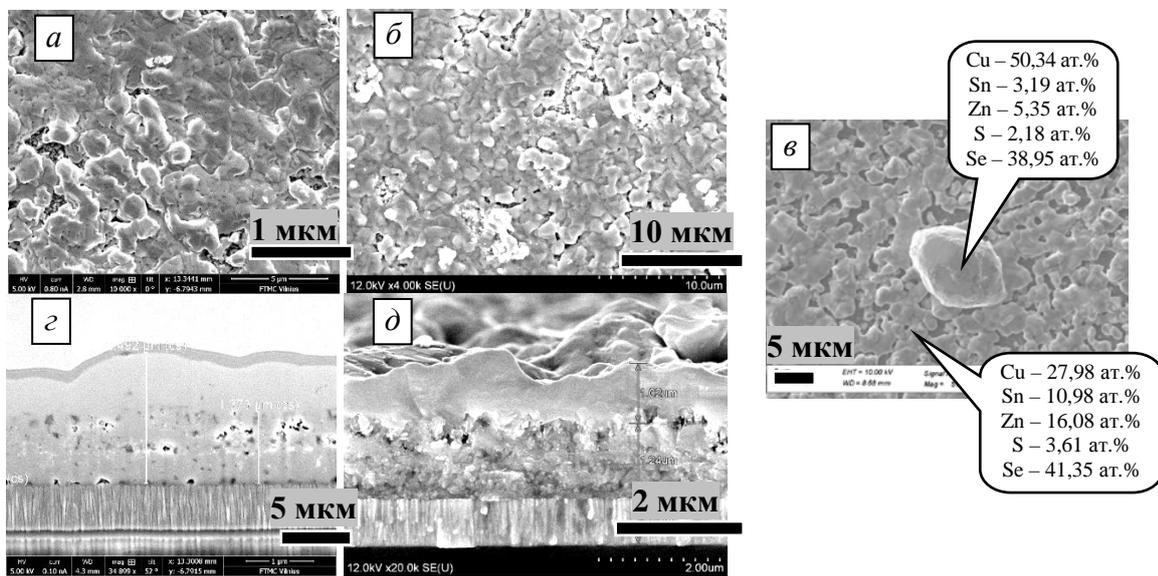


Рисунок 5 – Типичные СЭМ-изображения поверхности и поперечного сечения (скола) пленок CZTSSe, полученных на подложках Мо/стекло (серии **А** (а, с) и **Б** (б, д)) и из чистого стекла (серия **В** (е))

Толщина слоя CZTSSe во всех случаях составляет $\sim 2,5$ мкм (рисунок 5с, д). В слое пленок и на границе пленка-подложка присутствуют пустоты размером до 200 нм. Присутствие таких пустот на границе подложки (Мо/стекло) с пленкой CZT(S,Se) наблюдали и в других работах [11]–[13]. Но причина их появления не обсуждалась и не ясна. Представленное изображение поперечного скола пленок CZTSSe на рисунке 5д отчетливо демонстрирует их двухслойную структуру, где нижний слой толщиной $\sim 1,2$ мкм состоит из плотно упакован-

ных мелких зерен, а верхний – представлен однородным слоем толщиной $\sim 1,0$ мкм. Согласно полученным результатам элементного картирования все элементы (Cu, Zn, Sn) распределены равномерно по толщине пленок CZTSSe во всех случаях за исключением S и Se (рисунок 6). На картированных изображениях поперечного скола пленок CZTSSe видно, что вся сера находится в слое Mo и только незначительная ее концентрация диффундирует в слой CZTSSe в пределах 500 нм. В то же время селен распределен по всей толщине пленок и только на границе с подложкой в области смешивания с серой наблюдается незначительное снижение концентрации. Это может частично объяснить образование двухслойной структуры пленок из-за замещения S на Se. Помимо этого, на картированных изображениях пленок серии Б видно небольшое увеличение концентрации цинка вблизи границы пленка-подложка, что может указывать на существование побочной фазы ZnS(Se) в данной области (рисунок 6).

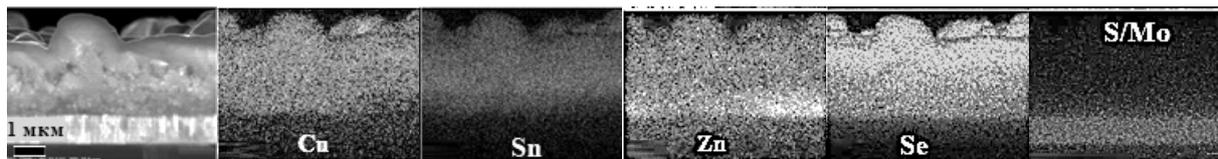


Рисунок 6 – Элементное картирование поперечного сечения пленок CZTSSe на подложках Mo/стекло (серия Б)

На рисунке 7 представлены типичные АСМ-изображения пленок CZTSSe, нанесенных на подложки Mo/стекло и из чистого стекла. Во всех случаях поверхность пленок представлена зернистой структурой. Для пленок, полученных на подложках Mo/стекло (рисунок 7а и б), характерны крупные образования до 2 мкм, состоящие из более мелких зерен (хорошо видно для серии А). В то время как для пленок CZTSSe, полученных на подложке из чистого стекла, характерны крупные образования размером до 3 мкм (рисунок 7в).

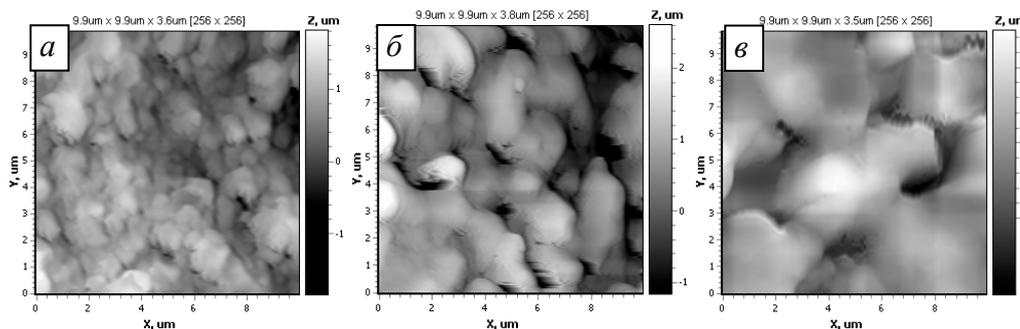


Рисунок 7 – Типичные АСМ-изображения тонких пленок CZTSSe, полученных на подложках Mo/стекло (серии А (а) и Б (б)) и из чистого стекла (серия В (в))

Из результатов, представленных в таблице 2, видно, что значения параметров шероховатости поверхности пленок CZTSSe, полученных на подложках Mo/стекло, имеют незначительное расхождение, но значительно отличаются от значений для пленок на подложках из стекла без Mo. Параметры шероховатости поверхности для пленок CZTSSe, нанесенных на подложки Mo/стекло, меньше в 2–4 раза, чем для пленок на подложках из чистого стекла, что указывает на влияние топографии (типа) подложек на формирование морфологии пленок.

Параметры шероховатости для пленок серии А увеличены в два раза по сравнению с пленками серии Б (на подложках Mo/стекло). Большие параметры шероховатости для пленок серии А можно объяснить влиянием крупных образований, состоящих из мелких зерен, которые приводят к увеличению числа границ и, соответственно, к увеличению шероховатости поверхности; формирование такой морфологии обусловлено по-видимому большей концентрацией меди в составе пленок (таблица 3). Для пленок серии Б характерны крупные образования округлой формы, что приводит к уменьшению числа границ и, соответственно, к снижению шероховатости их поверхности. Кроме того, значение перепада рельефа поверхности для пленок серии А выше, чем для серии Б (таблица 2).

Заключение. В данной работе были проведены исследования фазового состава и микроструктуры тонких пленок CZTSSe, полученных путем селенизации послойно нанесенных магнетронным напылением прекурсоров Cu/Sn/ZnS на стеклянные подложки с и без Mo-подслоя. Установлено, что элементный состав прекурсоров, нанесенных на различные подложки, отличается незначительно и их толщина во всех случаях соответствует технологически задаваемой. Обнаружено, что все прекурсоры содержат фазы $\text{Cu}_{6,26}\text{Sn}_5$ и Sn, а также возможные фазы Zn и CuS_2 . Кроме того, прекурсоры, нанесенные на подложки без Mo-подслоя или с большим содержанием серы в составе, содержат дополнительную фазу ZnS. Установлено, что тонкие пленки CZTSSe по элементному составу отличаются незначительно при использовании для их получения прекурсоров с отличающимися концентрациями по Cu и Sn (< 4 ат.%). РФА показал, что пленки на подложках Mo/стекло содержат основную фазу CZTSe, а также побочную фазу ZnS(Se). В случае пленок на подложках без Mo-подслоя обнаружено сосуществование фазы CZTSe и побочных фаз ZnS(Se) и Cu_3Se_2 . Независимо от типа подложек поверхность пленок CZTSSe представлена плотно упакованными крупными кристаллами, а их толщина составляет ~2,5 мкм. Установлено, что параметры шероховатости поверхности пленок зависят от их элементного состава и типа подложек.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке БРФФИ (№ T19M-022) и ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» (Задание 1.4.1).

Литература

1. Earth-Abundant $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (CZTSSe) Solar Cells // *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells* / S. Das [et al.] ; editors M. P. Paranthaman [et al.]. – Switzerland, 2016. – Vol. 2. – P. 25–74.
2. Shockley, W. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells / W. Shockley, H. J. Queisser // *J. Appl. Phys.* – 1961. – Vol. 32, № 3. – P. 510–519.
3. Solar cell efficiency tables (Version 53) / M. A. Green [et al.] // *Progress in Photovoltaics : Research and Applications.* – 2018. – Vol. 27, № 1. – P. 3–12.
4. Improving the open circuit voltage through surface oxygen plasma treatment and 11,7 % efficient $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ solar cell / H. Tampo [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2019. – Vol. 11, № 14. – P. 13319–13325.
5. High flexible $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ solar cells by green solution-process / Y. Qiong [et al.] // *Solar Energy.* – 2019. – Vol. 177. – P. 508–516.
6. Device Characteristics of an 11,4 % CZTSe Solar Cell Fabricated from Sputtered Precursors / T. Taskesen [et al.] // *Adv. Energy Mater.* – 2018. – Vol. 8, № 16. – P. 1703295.
7. Scragg, J. J. Copper Zinc Tin Sulfide Thin Films for Photovoltaics / J. J. Scragg. – Berlin : Springer Heidelberg, 2011. – 204 p.
8. Yu-Chih, H. Liquidus projection and thermodynamic modeling of Sn-Zn-Cu ternary system / H. Yu-Chih [et al.] // *J. of Alloys and Compounds.* – 2009. – Vol. 477, № 1–2. – P. 283–290.
9. Влияние типа подложки на морфологию поверхности тонких пленок $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ / С. М. Барайшук [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2018. – № 11. – С. 35–40.
10. Microstructure and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ thin films / E. P. Zaretskaya [et al.] // *Известия высших учебных заведений. Электроника.* – 2018. – Vol. 23. – P. 230–239.
11. Highly Efficient Copper-Zinc-Tin-Selenide (CZTSe) Solar Cells by Electrodeposition / J. O. Jeon [et al.] // *ChemSusChem.* – 2014. – Vol. 7, № 4. – P. 1073–1077.
12. A CZTSe solar cell with 8,2 % power conversion efficiency fabricated using electrodeposited Cu/Sn/Zn precursor and a three-step selenization process at low Se pressure / L. Yao [et al.] // *Solar Energy Materials & Solar Cells.* – 2017. – Vol. 159. – P. 318–324.
13. Characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ solar cells prepared from electrochemically co-deposited Cu-Zn-Sn alloy / R. Kondrotas [et al.] // *Solar Energy Materials & Solar Cells.* – 2015. – Vol. 132. – P. 21–28.

¹Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению

²Белорусский государственный аграрный
технический университет

³ОАО «Интеграл»

Краткие сообщения

УДК: 591.5:595.794:599.363

Находка бурозубки малой (*Sorex minutus*) в гнезде шершня обыкновенного (*Vespa crabro*) на юго-востоке Беларуси

А.М. ОСТРОВСКИЙ¹, А.А. САВАРИН²

Приведены сведения о находке бурозубки малой (*Sorex minutus*) в гнезде шершня обыкновенного (*Vespa crabro*) на территории юго-востока Беларуси. Фрагменты скелета зверька были обнаружены 08.11.2020 в урочище Яслище Буда-Кошелёвского р-на Гомельской области при разборе шершневого гнезда, располагавшегося в дупле старого клёна на высоте 1,5 метров от поверхности земли.

Ключевые слова: юго-восток Беларуси, гнездо шершня, бурозубка малая.

Data on the record of pygmy shrew (*Sorex minutus*) in the nest of hornet (*Vespa crabro*) in South-Eastern Belarus are analyzed. Fragments of the animal's skeleton were found on 08.11.2020 in the village of Yaslishche of Buda-Koshelevo district (Gomel region) during the analysis of a hornet's nest located in the hollow of an old maple tree at a height of 1,5 meters from the ground surface.

Keywords: south-east of Belarus, hornet's nest, pygmy shrew.

Введение. Шершень обыкновенный (*Vespa crabro* Linnaeus, 1758) – самый крупный представитель складчатокрылых ос Беларуси. Вид широко распространен на территории всей республики [1], но наиболее многочислен в южных регионах страны [2]. Шершни всеядны. Имаго питаются в основном пищей, богатой углеводами (соком деревьев, «сладкими» выделениями тлей, нектаром цветов, плодами фруктовых и ягодных культур), в то время как развивающихся личинок рабочие особи выкармливают белковой пищей (различными беспозвоночными, мясом мелких млекопитающих, рыбой и т. п.) [3].

Цель работы – обратить внимание специалистов на перспективу использования гнезд шершня для выявления обитания малоизученных видов микротириофауны Беларуси.

Результаты и обсуждение. 08.11.2020 г. в урочище Яслище Буда-Кошелёвского района Гомельской области при разборе шершневого гнезда, располагавшегося в дупле старого клёна на высоте 1,5 метров от поверхности земли (рисунок 1), были обнаружены части скелета мелких млекопитающих. Географические координаты места находки: 52°33'03"N, 30°24'09"E.

Костные фрагменты были представлены трубчатыми костями конечностей и одной нижней челюстью бурозубки (рисунок 2, угловой отросток частично отломан). Идентифицировать принадлежность всех костей только одной особи землеройки – не представляется возможным.

Диагностически значимые промеры нижней челюсти: длина основания челюсти – 5,50 мм, длина нижнего зубного ряда – 5,80 мм, высота восходящей ветви – 3,00 мм, высота в области коренных зубов – 0,75 мм, ширина основания венечного отростка – 1,70 мм.

Угловой отросток тонкий. Пигментация первого резца – типичная для особей вида.

Низкая степень стачивания зубов соответствует возрасту сеголетка.

Анализ указанных характеристик позволяет утверждать, что найденная нижняя челюсть принадлежит бурозубке малой (*Sorex minutus* Linnaeus, 1766). Этот вид землероек – обычный, местами многочисленный вид на всей территории Беларуси. Масса тела зверька составляет чаще всего 3–4 г. Полагаем, что шершень выгрызал ткани погибшей особи бурозубки и использовал их для кормления личинок. Факты нахождения шершней на падали мелких млекопитающих нам известны.



Рисунок 1 – Место находки бурозубки малой в гнезде шершня:
А – участок ствола клёна с дуплом (указано расположение гнезда), Б – внешний вид гнезда

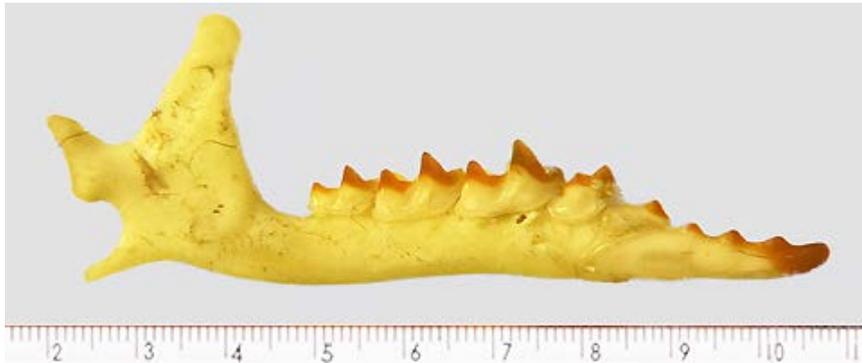


Рисунок 2 – Нижняя челюсть бурозубки малой

Заключение. Данная находка представляет интерес для специалистов-териологов. С целью мониторинга микротериофауны традиционно используют разнообразные ловушки, а также анализ погадок хищных ночных птиц. Считаем, что разбор заброшенных гнезд шершня может стать вспомогательным методом для выявления мест обитания некоторых малоизученных видов мелких млекопитающих Беларуси (например: бурозубки крошечной *S. minutissimus* Zimmermann, 1780, белозубки малой *Crocidura suaveolens* (Pallas, 1811) и др.).

Литература

1. Шляхтёнок, А. С. Аннотированный каталог ос (Hymenoptera, Aprocrita, Aculeata) Беларуси / А. С. Шляхтёнок. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 259 с.
2. Островский, А. М. К экологии общественных складчатокрылых ос (Hymenoptera, Vespidae: Vespinae, Polistinae) юго-востока Беларуси / А. М. Островский // Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы : мат-лы Всероссийской конференции молодых ученых с междунар. участием, Улан-Удэ, 23–27 июня 2016 г. / ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН ; редкол.: Л. Л. Убугунов [и др.]. – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. – С. 102–103.
3. Шляхтёнок, А. С. Путешествие в удивительный мир ос / А. С. Шляхтёнок. – Минск : Беларус. навука, 2015. – 93 с.

¹Гомельский государственный
медицинский университет

²Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

УДК: 582.29 (476.2)

The red-listed *Cetrelia cetrarioides* (Parmeliaceae) is confirmed by molecular data in Belarus

A.G. TSURYKAU¹, V.V. GOLUBKOV, P.-E. PERSSON², A. THELL²

The new locality of the Red-listed lichen *Cetrelia cetrarioides* was discovered in Belovezhskaya Puscha National Park. The occurrence of this species was confirmed by the sequence of the ITS region.

Keywords: biodiversity, distribution, Red Data Book, lichens, ITS.

Новое место произрастания краснокнижного лишайника *Cetrelia cetrarioides* выявлено в национальном парке «Беловежская пушча». Определение вида подтверждено секвенированием фрагмента ITS оперона 5.8S гена ядерной рДНК.

Ключевые слова: биоразнообразие, распространение, Красная книга, лишайники, ITS.

The genus *Cetrelia* W.L. Culb. & C.F. Culb. is currently represented by 18 species worldwide [1], of which only four species occur in Europe [2], [3]. In Belarus, three species were confirmed by means of thin-layer chromatography (TLC) during the recent revision of 203 collections from the herbaria of GRSU, GSU, MSK, MSKH and MSKU, namely *Cetrelia cetrarioides* (Duby) W.L. Culb. & C.F. Culb., *C. monachorum* (Zahlbr.) W.L. Culb. & C.F. Culb. and *C. olivetorum* (Nyl.) W.L. Culb. & C.F. Culb. [4]. Of these, *C. cetrarioides* appeared to be the least frequent one being known from 13 records only.

A fieldtrip to Belovezhskaya Puscha National Park was made by the first and the second authors in August 2018. The purposes of the trip were taxonomical investigations of the isidiate *Parmelia* species [5] and populational studies to re-assess the species boundaries between *Usnea subfloridana* and *Usnea florida* [6]. The detection of new localities of rare and Red-listed species was also among the main goals of the excursions.

During the fieldtrip, seven new localities of well-developed populations of the *Cetrelia* species were found. Of these, two appeared to be *Cetrelia monachorum* and five were identified as belonging to *Cetrelia olivetorum* by TLC. No new localities of the rarest *Cetrelia cetrarioides* were believed to have been found [7]. However, the investigation of one isidiate *Parmelia* collection revealed few young small *Cetrelia* thalli. Molecular studies suggested these as belonging to *Cetrelia cetrarioides*.

ITS-sequences were amplified with the primers ITS5 and ITS4 [8], and extraction of total DNA and amplification of the ITS1-5.8S-ITS2 ribosomal RNA region followed the standard methods [9]. BLAST searches were performed for the sequences [10] which were aligned by MUSCLE algorithm in MEGA software package and compared with sequences from GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>).

The evolutionary history was inferred using the Maximum Parsimony method for five sequences, of which four were downloaded from GenBank (Table 1). The phylogenetic tree shows a well delimited *Cetrelia cetrarioides* clade which includes the Belarusian specimen (Figure 1).

There are two specimens of *Cetrelia cetrarioides* known from the two last decades, both from the Northern Belarus [4]. The studied specimen confirms the presence of this species in Belovezhskaya Puscha National Park nowadays.

Table 1 – Location, collector and GenBank accession numbers of sequences used in the analyses

Species	Location, collector, voucher	GenBank Accession Number
<i>Cetrelia cetrarioides</i>	Norway, Rui and Timdal O-L-200022	MK812062
<i>Cetrelia cetrarioides</i>	Spain, Ruibal MAF:Lich 15552	JN943844
<i>Cetrelia cetrarioides</i>	Belarus, Tsurykau s.n.	MZ028437
<i>Cetrelia olivetorum</i>	Estonia, Randlane and Saag CKM59	KX685871
<i>Cetrelia monachorum</i>	Russia, Notov CKM52	KX685865

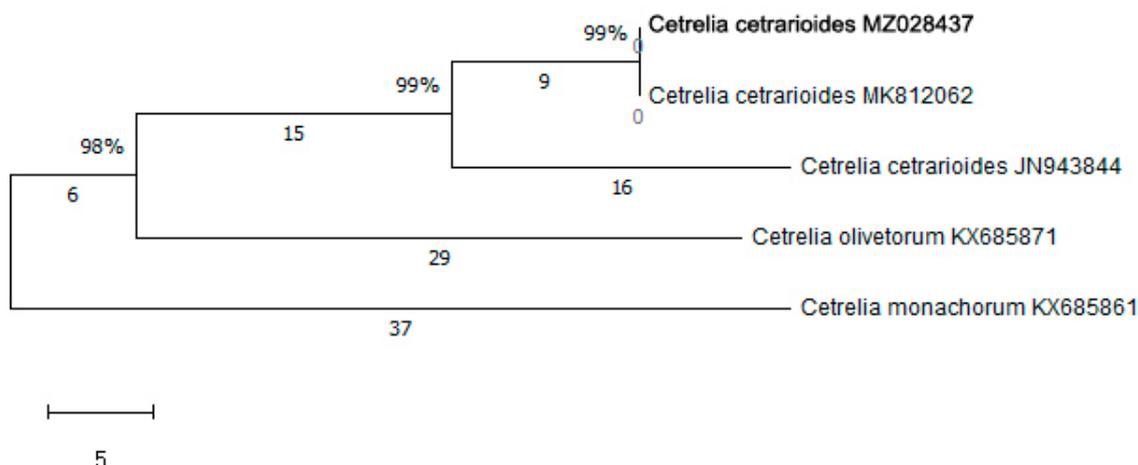


Figure 1 – A Bootstrap consensus tree based on an analysis of 5 ITS *Cetrelia* sequences using Maximum Parsimony method. Belarusian specimen is marked in bold

Specimen examined. Belarus, Brest region, Kamenets district, Belovezhskaja Puscha National Park, Khvoynik forest, 349 q., 5 km N of Khvoynik village, 52°44'N, 23°58'E, oak forest, on fallen moss-covered branch of *Quercus robur*, leg. A. Tsurykau, 09.08.2018.

Literature

1. Outline of fungi and fungus-like taxa / N. N. Wijayawardene [et al.] // *Mycosphere*. – 2020. – Vol. 11, № 1. – P. 1060–1456.
2. A first checklist of parmelioid and similar lichens in Europe and some adjacent territories, adopting revised generic circumscriptions and with indications of species distributions / D. L. Hawksworth [et al.] // *The Lichenologist*. – 2008. – Vol. 40. – P. 1–21.
3. The checklist of parmelioid and similar lichens in Europe and some adjacent territories: additions and corrections / D. L. Hawksworth [et al.] // *The Lichenologist*. – 2011. – Vol. 43. – P. 639–645.
4. The lichen genus *Cetrelia* in Belarus: distribution, ecology and conservation / P. Bely [et al.] // *Botanica Lithuanica*. – 2014. – Vol. 20, № 2. – P. 69–76.
5. The lichen genus *Parmelia* (Parmeliaceae, Ascomycota) in Belarus / A. Tsurykau [et al.] // *Herzogia*. – 2019. – Vol. 32. – P. 375–384.
6. Low genetic differentiation between apotheciate *Usnea florida* and sorediate *Usnea subfloridana* (Parmeliaceae, Ascomycota) based on microsatellite data / P. Degtjarenko [et al.] // *Fungal Biology*. – 2020. – Vol. 124. – P. 892–902.
- 7 Golubkov, V. V. Monitoring of rare lichens included in the Red Data Book on the territory of the Belovezhskaya Pushcha National Park (Belarus) / V. Golubkov, A. Tsurykau // *Belovezhskaya Pushcha. Research*. – 2020. – Vol. 17. – In press.
8. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics / T. J. White [et al.] // *PCR protocols: a guide to methods and application* / Eds.: M. A. Innis [et al.]. – San Diego : Academic Press, 1990. – P. 315–322.
9. Notes on the systematics, chemistry and distribution of European *Parmelia* and *Punctelia* species (lichenized ascomycetes) / A. Thell [et al.] // *Sauteria*. – 2008. – Vol. 15. – P. 545–559.
10. Basic local alignment search tool / S. F. Altschul [et al.] // *Journal of Molecular Biology*. – 1990. – Vol. 215. – P. 403–410.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Lund University

Технический редактор: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *В.А. Бобрик, Г.Н. Петухова*

Подписано в печать 04.06.2021. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 17,9. Уч.-изд. л. 15,6. Тираж 100 экз. Заказ № 288.
Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.